

Université de Montréal

**Développements algorithmiques pour l'amélioration des résultats de
l'interférométrie RADAR en milieu urbain**

par
Ayoub Tlili

Département de géographie
Faculté des arts et des sciences

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Philosophie Doctorat (Ph.D.)
en géographie

Octobre, 2020

© Ayoub Tlili, 2020.

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée:

**Développements algorithmiques pour l'amélioration des résultats de
l'interférométrie RADAR en milieu urbain**

présentée par:

Ayoub Tlili

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes:

François Girard,	président-rapporteur
François Cavayas,	directeur de recherche
Samuel Foucher,	codirecteur
Claude Codjia,	membre du jury
Giampaolo Ferraioli,	examineur externe

Thèse acceptée le: 26/02/2021

RÉSUMÉ

Le suivi des espaces urbanisés et de leurs dynamiques spatio-temporelles représente un enjeu important pour la population urbaine, autant sur le plan environnemental, économique et social. Avec le lancement des satellites portant des radars à synthèse d'ouverture de la nouvelle génération (TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, ALOS, RADARSAT-2, Sentinel-1, Constellation RADARSAT), il est possible d'obtenir des séries temporelles d'images avec des résolutions spatiales et temporelles fines. Ces données multitemporelles aident à mieux analyser et décrire les structures urbaines et leurs variations dans l'espace et dans le temps. L'interférométrie par satellite est effectuée en comparant les phases des images RSO prises à différents passages du satellite au-dessus du même territoire. En optant pour des positions du satellite séparées d'une longue ligne de base, l'InSAR mène à la création des modèles numériques d'altitude (MNA). Si cette ligne de base est courte et à la limite nulle, nous avons le cas de l'interférométrie différentielle (DInSAR) qui mène à l'estimation du mouvement possible du terrain entre les deux acquisitions. Pour toutes les deux applications de l'InSAR, deux opérations sont importantes qui garantissent la génération des interférogrammes de qualité. La première est le filtrage du bruit omniprésent dans les phases interférométriques et la deuxième est le déroulement des phases. Ces deux opérations deviennent particulièrement complexes en milieu urbain où au bruit des phases s'ajoutent des fréquents sauts et discontinuités des phases dus à la présence des bâtiments et d'autres structures surélevées.

L'objectif de cette recherche est le développement des nouveaux algorithmes de filtrage et de déroulement de phase qui puissent mieux performer que les algorithmes considérés comme référence dans ce domaine. Le but est d'arriver à générer des produits InSAR de qualité en milieu urbain. Concernant le filtrage, nous avons établi un algorithme qui est une nouvelle formulation du filtre Gaussien anisotrope adaptatif. Quant à l'algorithme de déroulement de phase, il est fondé sur la minimisation de l'énergie par un algorithme génétique ayant recours à une modélisation contextuelle du champ de phase. Différents tests ont été effectués avec des images RSO simulées et réelles qui

démontrent le potentiel de nos algorithmes qui dépasse à maints égards celui des algorithmes standard. Enfin, pour atteindre le but de notre recherche, nous avons intégré nos algorithmes dans l'environnement du logiciel SNAP et appliqué l'ensemble de la procédure pour générer un MNA avec des images RADARSAT-2 de haute résolution d'un secteur de la Ville de Montréal (Canada) ainsi que des cartes des mouvements du terrain dans la région de la Ville de Mexico (Mexique) avec des images de Sentinel-1 de résolution plutôt moyenne. La comparaison des résultats obtenus avec des données provenant des sources externes de qualité a aussi démontré le fort potentiel de nos algorithmes.

Mots clés: Filtrage de phase, Déroulement de phase, InSAR, MNA, DInSAR, Cartes de mouvement de surface

ABSTRACT

The monitoring of urban areas and their spatiotemporal dynamics is an important issue for the urban population, at the environmental, economic, as well as social level. With the launch of satellites carrying next-generation synthetic aperture radars (TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, ALOS, RADARSAT-2, Sentinel-1, Constellation RADARSAT), it is possible to obtain time series of images with fine temporal and spatial resolutions. These multitemporal data help to better analyze and describe urban structures, and their variations in space and time. Satellite interferometry is performed by comparing the phases of SAR images taken at different satellite passes over the same territory. By opting for satellite positions separated by a long baseline, InSAR leads to the creation of digital elevation models (DEM). If this baseline is short and, at the limit zero, we have the case of differential interferometry (DInSAR) which leads to the estimation of the possible movement of the land between the two acquisitions. In both InSAR applications, two operations are important that ensure the generation of quality interferograms. The first is the filtering of ubiquitous noise in the interferometric phases and the second is the unwrapping of the phases. These two operations become particularly complex in urban areas where the phase noise is added to the frequent jumps and discontinuities of phases due to the presence of buildings and other raised structures.

The objective of this research is the development of new filtering and phase unwrapping algorithms that can perform better than algorithms considered as reference in this field. The goal is to generate quality InSAR products in urban areas. Regarding filtering, we have established an algorithm that is a new formulation of the adaptive anisotropic Gaussian filter. As for the phase unwrapping algorithm, it is based on the minimization of energy by a genetic algorithm using contextual modelling of the phase field. Various tests have been carried out with simulated and real SAR images that demonstrated the potential of our algorithms that in many respects exceeds that of standard algorithms. Finally, to achieve the goal of our research, we integrated our algorithms into the SNAP software environment and applied the entire procedure to generate a DEM with high-

resolution RADARSAT-2 images from an area of the City of Montreal (Canada) as well as maps of land movement in the Mexico City region (Mexico) with relatively medium-resolution Sentinel-1 images. Comparison of the results with data from external quality sources also demonstrated the strong potential of our algorithms.

Index terms: Phase Filtering, Phase unwrapping, InSAR, DEM, DInSAR, Surface Displacement Maps

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT	v
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xii
NOTATION	xvii
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Contexte et problématique de la recherche	1
1.2 Objectifs et hypothèses	3
1.3 Contributions et originalité	4
1.4 Structure de la thèse	5
CHAPITRE 2 : INTERFÉROMÉTRIE RADAR : UN APERÇU	9
2.1 Les mesures d'un RSO	9
2.2 Principes d'application de la technique interférométrique	12
2.2.1 Création des modèles numériques d'altitude (MNA)	12
2.2.2 Création des cartes de déformation de surface	14
2.3 Étapes de la technique interférométrique : aperçu	14
2.3.1 Sélection des paires interférométriques	14
2.3.2 Recalage	16
2.3.3 Filtrage en portée et en azimuth	17
2.3.4 Formation de l'interférogramme et de l'image de cohérence	17
2.3.5 Traitements spéciaux de l'interférogramme	18
2.3.6 Déroulement de phase	20

2.3.7	Conversion des phases	21
2.4	Algorithmes de filtrage et de déroulement de phases : état de l'art	23
2.4.1	Filtrage de l'interférogramme	23
2.4.2	Déroulement de phase	26
CHAPITRE 3 : APPLICATION DE L'INSAR EN MILIEU URBAIN . . .		39
3.1	Production d'un MNS : Cas de l'agglomération de Montréal	39
3.1.1	Site d'étude	39
3.1.2	Données utilisées	39
3.1.3	Approche méthodologique	42
3.2	Production d'une carte de déformations du terrain : Cas de la zone métropolitaine de la vallée de Mexico (ZMVM)	44
3.2.1	Site d'étude	44
3.2.2	Données utilisées	45
3.2.3	Approche méthodologique	46
CHAPITRE 4 : UNE NOUVELLE FORMULATION DU FILTRE GAUS- SIEN ANISTROPIQUE ADAPTATIF POUR LE FILTRAGE D'INTERFÉROGRAMME		50
4.1	Introduction	52
4.2	Theoretical framework of the proposed method	54
4.2.1	Probability distribution function of the interferometric phase noise	54
4.2.2	Proposed filter	56
4.3	Datasets	59
4.4	Results and discussions	61
4.4.1	Simulated InSAR data	62
4.4.2	Real InSAR data	63
4.5	Conclusion	64
CHAPITRE 5 : UNE NOUVELLE MÉTHODE DE DÉROULEMENT DE PHASE INTERFÉROMÉTRIQUE BASÉE SUR UNE MI-		

NIMISATION D'ENERGIE D'UNE MODÉLISATION CONTEX-	
TUELLE	73
5.1 Introduction	75
5.2 Proposed Phase Unwrapping Algorithm	77
5.2.1 Contextual modeling of the phase field	77
5.2.2 Cost function	83
5.2.3 Optimization	84
5.3 Data used	85
5.3.1 Real InSAR data	85
5.3.2 Simulated InSAR data	87
5.4 Results and discussions	88
5.5 Conclusion	90
 CHAPITRE 6 : SUR L'APPLICABILITÉ DES NOUVEAUX ALGORITHMES	
DE FILTRAGE ET DE DÉROULEMENT DE PHASE POUR	
LA GÉNÉRATION DE MNA ET LA SURVEILLANCE DES	
DÉFORMATIONS DANS LES ÉCOSYSTÈMES URBAINS	104
6.1 Introduction	106
6.2 Study sites and data	108
6.3 Methodology	112
6.3.1 Sentinel-1 deformation map	113
6.3.2 Proposed algorithms	116
6.3.3 Reference algorithms	119
6.4 Results and discussions	120
6.4.1 Sentinel-1 deformation map	120
6.4.2 InSAR based DEM	122
6.5 Conclusion	125
 CHAPITRE 7 : DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS	131
7.1 Discussions générales	131
7.2 Conclusions	134

7.3	Recherches futures	135
-----	------------------------------	-----

LISTE DES TABLEAUX

4.I	Simulated interferogram filtering results	63
4.II	SSIM results for a simulated interferogram	63
4.III	Real interferogram filtering results	64
4.IV	SSIM results for the real interferogram	64
5.I	Mean Squared Error values. PA is the proposed algorithm, BC is the Branch Cuts algorithm, MCF is the Minimum CostFlow Networks algorithm, and LS is the Minimum L^p -norm algorithm . . .	90
5.II	Structural similarity index (SSIM) values	90
5.III	Running times cost in seconds for the different algorithms	90
6.I	Comparison over areas of important subsidence rates (m/month) measured by the current method, the reference method (Goldstein-SNAPHU) and derived from the literature	122
6.II	Mean Squared Error (MSE) and the Structural Similarity Index (SSIM) are used to compared the produced displacement (DSP) maps in Fig. 6.5.	122
6.III	Mean Squared Error (MSE).	123

LISTE DES FIGURES

2.1	Principe du radar à synthèse d'ouverture (SAR)	10
2.2	Géométrie d'acquisition de la paire interférométrique d'images . .	13
2.3	Mouvement mesuré en DInSAR (vecteur bleu) dans la direction de la portée (LOS= line of sight) et mouvement réel du sol (vec- teur rouge) (source : Anonymous (2010) Interferometric Synthetic Aperture Radar. http ://www.risknet-alcotra.org/rna/allegati/insar- manual-20101008-468.pdf , consulté juin 2020)	23
3.1	(a) Organisation spatiale de l'agglomération de Montréal [2] (le site d'étude est limité par le cadre rouge), (b) La région de Mont- Royal et les sites environnants de l'agglomération de Montréal [3], (c) Un modèle numérique d'altitudes (en pieds) superposé sur une image aérienne de la zone d'étude	40
3.2	La paire d'images RADARSAT-2 (polarization HH; mode ultra- fin) couvrant la zone d'étude acquises respectivement le 5 juin 2018 (a) et le 29 juin 2018 (b); (c) MNS Lidar de la zone d'étude	41
3.3	Étapes de traitement InSAR des images RADARSAT-2 pour la création d'un MNA de la zone d'étude	43
3.4	(a) Localisation du bassin du Mexique (b) Zone d'analyse (carré rouge) dans le bassin du Mexique. La ZMVM est colorée en gris et la capitale Mexico est indiquée par l'étoile rouge, (c) Physio- graphie de la zone d'étude [8], les principales caractéristiques de la zone d'étude sont représentées : Chaîne montagneuse, collines et anciens lacs (Texcoco, Xaltocan et Zumpango).	44
3.5	Images Sentinel-1 acquises respectivement a) le 8 novembre 2014; b) le 2 décembre 2014	46
3.6	Étapes de traitement DInSAR des images Sentinel-1 pour la créa- tion d'une carte de déformation de surface de la zone d'étude . . .	47

4.1	Single look probability density function of the interferometric phase noise according to the interferometric coherence value γ and the phase difference value ϕ	55
4.2	(a) Interferometric coherence from a pair Radarsat-2 images, and (b) Digital surface model (DSM) covering a region of the city of Montreal	55
4.3	Multibook probability density function for the phase as a function of the number of looks (NL) for a constant coherence value $\gamma = 0.5$	56
4.4	Phase noise variance σ_{ϕ}^2 as a function of interferometric coherence γ and looks number NL	57
4.5	Anisotropic Gaussian Filter (AGF)	58
4.6	Radarsat-2 intensity images (HH polarization; ultra-fin mode) . .	59
4.7	Real interferogram created from an interferometric processing; (a) Interferogram; (b) Interferometric coherence	60
4.8	Simulated (b) and noised (c) interferogram based on DSM (a) covering a region of the city of Montreal	61
4.9	filtered simulated interferogram : (a)Goldstein, (b)Baran, (c)InSAR-Lee, (d)Refined-Lee, (e)Boxcar, (f)PAGF	67
4.10	Interferogram subset filtering : (a)Simulated interferogram without noise, (b)Simulated and noised interferogram, (c)Goldstein, (d)Baran, (e)InSAR-Lee, (f)Refined-Lee, (g)Boxcar, (h)PAGF	68
4.11	SSIM map for a simulated interferogram : (a)Goldstein, (b)Baran, (c)InSAR-Lee, (d)Refined-Lee, (e)Boxcar, (f)PAGF	69
4.12	filtered real interferogram : (a)Goldstein, (b)Baran, (c)InSAR-Lee, (d)Refined-Lee, (e)Boxcar, (f)PAGF	70
4.13	Interferogram subset filtering : (a)Real interferogram without noise, (b)Real interferogram, (c)Goldstein, (d)Baran, (e)InSAR-Lee, (f)Refined-Lee, (g)Boxcar, (h)PAGF	71
4.14	SSIM map for the real interferogram : (a)Goldstein, (b)Baran, (c)InSAR-Lee, (d)Refined-Lee, (e)Boxcar, (f)PAGF	72

5.1	Different types of phase jumps in an interferogram caused by : coherence loss (a), a building height (b), topography (c) and (d) with a steeper topography in (c). The black pixel indicates the central pixel.	79
5.2	Example of boxcar gradient operator : window of 7×7 ; horizontal direction	81
5.3	Flowchart of the phase unwrapping algorithm where <i>iter</i> is the iteration number, and $E(L)$ is the energy system given by the ratio between the sum of all pixel costs in a given iteration and the number of iterations	86
5.4	Processing data of the optimization algorithm as a function of the number of iterations ((a) Initial interferogram (b) After 200; (c) 500; (d) 1000 (e) 1322 iterations)	95
5.5	Radarsat-2 images acquired on June 5, 2018 (a) and June 29, 2018 (b), covering part of the city of Montreal (Quebec, Canada)	96
5.6	(a) Interferogram generated from the pair of RADARSAT-2 images of Fig. 5.5; (b) Corresponding interferometric coherence image; (c) Filtered interferogram;	97
5.7	(a) Portion of a Digital Terrain Model (DEM) of the study site; (b) Interferogram with $\gamma = 0.6$; (c) Interferogram with $\gamma = 0.3$	98
5.8	((a) Portion of a Digital Surface Model (DSM) of the study site; (b) Simulated interferogram; (c) after filtering of (b)	99
5.9	Results of phase unwrapping algorithms applied on the interferogram Fig. 5.7(b) : (a) Branch Cuts (BC), (b) Minimum Cost Flow Networks (MCF), (c) Minimum L^p -norm (LS), and (d) Proposed Algorithm (PA)	100
5.10	Results of phase unwrapping algorithms applied on the interferogram Fig. 5.7(c) : (a) Branch Cuts (BC), (b) Minimum Cost Flow Networks (MCF), (c) Minimum L^p -norm (LS), and (d) Proposed Algorithm (PA)	101

5.11	Results of phase unwrapping algorithms applied on the interferogram Fig. 5.8(d) : (a) Branch Cuts (BC), (b) Minimum Cost Flow Networks (MCF), (c) Minimum L^p -norm (LS), and (d) Proposed Algorithm (PA)	102
5.12	Results of phase unwrapping algorithms applied on the interferogram Fig. 5.6(c) : (a) Branch Cuts (BC), (b) Minimum Cost Flow Networks (MCF), (c) Minimum L^p -norm (LS), and (d) Proposed Algorithm (PA)	103
6.1	a) Spatial organization concept of the Montreal agglomeration [6] (the study site is bounded by the red rectangle), b) The Mount Royal area and surrounding sites [8], c) A digital elevation model superimposed on an aerial image of the study area	109
6.2	(a) and (b) interferometric pair of RADARSAT-2 intensity images (see text); (c) DSM Lidar	110
6.3	(a) Location of the Mexico City Basin (b) Studied area (red square) (c) Physiography of the site [20], the main characteristics of the study area are represented : mountain range, hills and ancient lakes (Texcoco, Xaltocan and Zumpango).	111
6.4	Burst Sentinel-1 intensity images acquired on a) November 8, 2014; b) December 2, 2014	112
6.5	Flowchart of the methodology applied for the generation of displacement maps by exploiting Sentinel-1 images	114
6.6	Flowchart of the methodology applied for the generation of DEM by exploiting RADARSAT-2 images	115
6.7	Flowchart of the phase unwrapping algorithm [23]	117

6.8	Displacement maps generated from a) the proposed Anisotropic Gaussian Filter and phase unwrapping algorithm b) the Goldstein filter and the SNAPHU unwrapping algorithms. The rectangles indicate examples in different areas where displacements are compared to existing studies : red rectangle : Near the Subway line in Nezahualcóyotl (lacustrine zone); green rectangle : in Ecatepec de Morelos, near the airport (lacustrine zone); blue rectangle : hilly area near Sierra de Guadalupe. The results are overlaid on a World Imagery	121
6.9	Difference in displacement between the proposed filtering and unwrapping methods and the standard Goldstein-SNAPHU methods overlaid on a World Imagery. The red and blue rectangles represent the areas analyzed in Fig. 6.6. The black dots indicate regions of important differences between these methods.	123
6.10	Interferogram (a) and coherence image (b) generated from the interferometric pair of RADARSAT-2 (figure 6.2); Application of the proposed algorithms (c); Application of the Goldstein-SNAPHU algorithms (f).	130

NOTATION

RSO	Radar à synthèse d'ouverture
InSAR	Interférométrie Radar
DInSAR	Interférométrie Radar pour le déplacement de surface
PolInSAR	Méthode d'InSAR multipolarisées
DInSAR	Interférométrie Radar pour le déplacement de surface
MNS	Modèle Numérique de surface
MNA	Modèle Numérique d'Altitude
MNT	Modèle Numérique de Terrain
SLC	Complexe Mono-vue (Single Look Complex)
SRTM	Mission Topographique de la navette Spatial Radar
PS	Diffusion Persistante (Persistent Scatterer)
MTI	Méthode d'InSAR Multi-temporelle
SBAS	Méthode du système de renforcement par satellite
AGK	Noyau Gaussien Anisotrope
AAG	Noyau Gaussien Anisotrope Adaptatif
QGFF	Méthode de remplissage guidée par la qualité du pixel
BC	Algorithme de "Branch Cut" pour le déroulement de phase
LS	Algorithme de "Lp-Norm" pour le déroulement de phase
MCF	Algorithme de Réseaux de flux de coûts minimum pour le déroulement de phase
SNAPHU	Algorithme de réseaux de flux de coûts statistique pour le déroulement de phase
RMSE	L'erreur quadratique moyenne
SSIM	Indice de similarité structurelle

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Contexte et problématique de la recherche

Les villes attirent une grande partie de la population mondiale. D'après les Nations Unies, le taux d'urbanisation à l'échelle planétaire a passé de 19% en 1910 (335 millions d'habitants) à 52% en 2011 (3,6 milliards d'habitants) [7]. Entre 1910 et 2010, la population urbaine a ainsi décuplé. Cette croissance démographique implique l'étalement des espaces urbanisés au détriment des espaces ruraux. Cette transformation de la vocation des terres a des répercussions importantes sur le climat, l'hydrologie (inondations éclair), la qualité de l'air et finalement, sur la santé humaine. Afin de mieux comprendre ces impacts, des métriques spatiales sont développées pour mieux analyser et décrire les structures urbaines, et leurs variations dans l'espace et dans le temps [19]. La télédétection peut contribuer à la recherche d'une urbanisation durable en fournissant des informations importantes et en permanence sur les changements des occupations du sol et les paramètres physiques des surfaces tels que la perméabilité, la morphologie, l'albédo, les températures, la rugosité et l'humidité, utiles à la modélisation et la compréhension de l'impact des modifications des environnements urbains et non urbains.

Les radars à synthèse d'ouverture (RSO) à bord des satellites ont gagné en importance ces dernières années dans les différentes applications de télédétection. Leurs images présentent un avantage certain par rapport aux images optiques : la très haute résolution temporelle. En effet, les RSO peuvent acquérir des images jour et nuit et sous des conditions météorologiques adverses. Cette capacité est maintenant accrue avec la mise en orbite des constellations de satellites comme la Mission de la Constellation RADARSAT (MCR) ou la constellation de COSMO-Skymed. Avec la nouvelle génération des RSO satellitaires (par ex. RADARSAT2, TerraSAR-X), la haute résolution spatiale (métrique) est maintenant atteinte. D'une autre part le rayonnement microondes met en évidence de manière unique les propriétés électriques et géométriques des surfaces vi-

sées. À part l'acquisition d'images multipolarisées, le rayonnement monochromatique et cohérent utilisé par le RSO permet aussi de mesurer la phase du signal. La phase en soi ne transmet pas d'information exploitable sur la cible. C'est la comparaison des phases des deux ou plusieurs images de la même scène qui nous permet de générer des informations intéressantes via la technique interférométrique (InSAR). Dans cette recherche, nous nous intéressons à deux domaines d'application de la technique interférométrique en territoire urbanisé : la création des modèles numériques d'altitude et la confection des cartes des mouvements de la surface terrestre. Pour un milieu urbain ces deux applications revêtent d'une grande importance. En effet, l'information sur le 3-D via les modèles numériques de surface (MNS) et de terrain (MNT) est la base pour un grand nombre d'études qui ont rapport, entre autres, à la pollution de l'air, le ruissellement des eaux, ou l'ensoleillement [2]. Concernant les mouvements de surface, c'est une application unique de l'interférométrie RSO (nous parlons plus précisément de l'interférométrie différentielle DInSAR) qui présente un intérêt certain pour la gestion et le monitoring des milieux urbains, particulièrement ceux construits dans des zones de grande sismicité ou des milieux urbains qui subissent une subsidence due par exemple au pompage massif de l'eau souterraine ([14], [5], entre autres).

L'établissement des MNS/MNT de résolution altimétrique fine nécessite l'utilisation des données RSO de résolution métrique. Les études avec de telles données en milieu urbain ne sont pas nombreuses. À titre d'exemple, Wittke et al. [18] cherchent à construire un MNS détaillé de la ville d'Helsinki à partir de données de TerraSAR-X en tandem à des fins de modélisation de la circulation des vents ou de simulation des inondations. Selon ces auteurs, l'établissement d'un tel MNS, particulièrement en milieu urbain dense est une opération difficile. La résolution spatiale originale des données radar de 5 m et les opérations de filtrage du bruit interférométrique font que la résolution finale du MNS n'est pas suffisamment fine. Les phénomènes comme l'inversion des façades des bâtiments élevés, les ombrages et les occlusions contribuent aussi à diminuer la qualité du MNS. Sefercik [16] pour sa part estime l'exactitude du MNS (grille de 3m x 3m), obtenu à partir des données de TerraSAR-X de haute résolution, à une dizaine de mètres en

fonction la pente du terrain. Aubrun [1] abouti à des résultats similaires avec des images TerraSAR-X de la ville de Montréal dans des zones industrielles. Il est donc légitime de se poser la question s'il y a place à l'amélioration de cette exactitude en établissant des traitements des données interférométriques mieux adaptés aux particularités des milieux urbains.

Une question similaire peut se poser dans le cas de la DInSAR. Selon les études présentées dans la revue de littérature sur ce sujet de Pepe et Calò [15], les exactitudes des cartes des déformations obtenues par DInSAR se situeraient entre quelques dizaines de mm et une ou deux dizaines de cm. Cette variabilité des résultats s'expliquerait par une multitude de facteurs comme la longueur d'onde du RSO, le bruit des phases ou les variations des conditions atmosphériques. Notre question de recherche est si l'application des techniques de traitement éventuellement développées dans le cas de la génération des MNS, peut s'étendre à la DInSAR et à la création des cartes de déformation précises en milieu urbain.

1.2 Objectifs et hypothèses

Pour répondre à nos questions de recherche, nous avons fixé comme objectif de développer des algorithmes de traitement des interférogrammes qui peuvent mener à l'amélioration de la qualité des produits interférométriques (MNS et carte des déformations) en milieu urbain. Pour atteindre cet objectif deux techniques de traitement nous ont intéressés en particulier : le filtrage et le déroulement des phases interférométriques.

L'opération du déroulement de phase est cruciale car de son efficacité dépend la création des produits de qualité. Mais avant de réaliser cette opération, il est recommandé de filtrer le bruit de phase qui dégrade la qualité de l'interférogramme et rend l'étape de déroulement de phase plus difficile.

Une littérature volumineuse existe sur le filtrage des phases [20]. À la lumière de nos lectures et les résultats de quelques tests préliminaires avec des données RSO interférométriques nous avons décidé de poursuivre notre recherche dans le domaine des

filtres adaptatifs de type Gaussien anisotrope. Notre hypothèse de recherche est que ces filtres, avec une définition adéquate de leur noyau, peuvent mieux performer en milieu urbain que les filtres standards comme celui de Goldstein et Werner [9] ou de Lee et al. [11] ou leurs variantes [20].

Comme dans le cas des filtres, une littérature volumineuse s’est formée depuis les trente dernières années dans le domaine du déroulement des phases [21]. Ici aussi, à la lumière de nos lectures et des tests préliminaires, nous avons opté pour des méthodes de déroulement de phase qui combinent un traitement local et un traitement global. Le traitement local vise à classer les pixels de l’interférogramme selon leur degré de ressemblance à des résidus (phases bruitées). Les pixels avec la plus forte ressemblance sont à éviter lors du traitement global tandis les moins ressemblants servent à amorcer le processus itératif de déroulement de phase. C’est notre seconde hypothèse de recherche, à savoir que, l’utilisation efficace des contraintes locales et globales peut mener à un déroulement de phase qui est mieux adapté dans le contexte urbain que des méthodes standards qui adoptent soit une méthode de déroulement locale (par ex. Brunch and cut [10]) ou une méthode globale (par ex. SNAPHU [3]).

Il y a une troisième hypothèse de notre recherche, à savoir, que les procédures qui seront développées sont efficaces autant pour la production d’un MNS que pour la génération des cartes de déformation.

1.3 Contributions et originalité

L’idée de base d’un filtre adaptatif est d’agir localement tenant compte des caractéristiques locales de l’interférogramme afin de préserver le motif de franges et les détails fins de la texture ainsi que de réduire au maximum le nombre des pixels résidus dans l’interférogramme. Notre principale contribution dans le domaine du filtrage est de repenser les caractéristiques d’un filtre Gaussien anisotrope adaptatif en admettant que le bruit de phase suit une distribution Gaussienne circulaire [17]. Nous démontrerons que ce filtre agit à maints égards mieux que les filtres standards.

Les méthodes locales de déroulement de phase [4, 10, 12] intègrent la phase point par point en choisissant un parcours d'intégration sans passer par les pixels résidus. Ces méthodes utilisent un paramètre de qualité associé à chaque pixel en mesurant la régularité de ce pixel par rapport à ceux qui l'entourent [13]. Ensuite, le processus de déroulement de phase commence par le pixel qui a la plus haute qualité et continue vers les pixels de qualité inférieure jusqu'au parcours de tous les pixels de l'interférogramme. Quoique ces algorithmes essaient d'éviter les pixels résidus tout au long du parcours d'intégration, la propagation des erreurs de proche en proche reste leur point faible. Les méthodes globales [3, 6, 8] pour leur part sont basées sur une modélisation à priori des sauts de phase par une fonction objective qui est minimisée en second lieu. Étant donné que la distribution des sauts de phase dans un interférogramme est souvent arbitraire, ces méthodes peuvent conduire à des résultats irréalistes. Notre principale contribution dans ce domaine est l'adoption d'une nouvelle approche de déroulement de phase. Dans un premier temps un poids est attribué à chaque pixel en utilisant une nouvelle mesure de qualité basée sur les variations du gradient de phase et le nombre de sauts de phase dans une fenêtre donnée. Les pixels qui ont un poids minimum correspondent généralement à des pixels résidus. Une fonction objective est alors définie qui est la somme des poids de tous les pixels de l'interférogramme. L'objectif est alors de minimiser cette fonction par le déroulement des pixels qui ont un poids maximal à chaque itération. Un algorithme génétique est utilisé à cette fin. Nous démontrerons que cette approche surpasse à maints égards les méthodes de déroulement de phase classique.

Une contribution également importante de notre recherche est que les procédures de filtrage et de déroulement des phases développées améliorent la qualité des produits interférométriques en milieu urbain tel que nous le démontrerons avec nos expériences.

1.4 Structure de la thèse

La thèse comprend six chapitres excluant le présent chapitre d'introduction (chapitres 2 à 7). Le chapitre 2 donne un bref aperçu de l'état de l'art du principe et des étapes de l'interférométrie radar. L'accent est principalement mis sur le filtrage de l'in-

terférogramme, ainsi que le déroulement de phase. Le chapitre 3 décrit les sites d'étude, les données utilisées ainsi que les méthodologies adoptées pour les traitements InSAR et DInSAR. Ce chapitre est une initiation aux chapitres 4, 5 et 6 qui sont des articles abordant chacun une étape de notre méthodologie. Les chapitres 4 et 5 présentent respectivement les algorithmes développés pour le filtrage ainsi que le déroulement des phases, tandis que, le chapitre 6 est une étude sur l'applicabilité de ces deux nouveaux algorithmes pour la génération d'un modèle numérique d'altitudes et d'une carte de déplacements du terrain en milieu urbain. Ces chapitres ont été rédigés en anglais sous forme d'études indépendantes et peuvent être lus indépendamment. Bien que chacun ait été préparé avec des collaborateurs, l'auteur de cette thèse est l'auteur principal de ces articles. Enfin, le chapitre 7 contient les discussions, les conclusions, et les recommandations tirées de ce projet de recherche.

Bibliographie

- [1] Michelle Aubrun. Extraction des informations sur la morphologie des milieux urbains par analyse des images satellites radars interférométriques. 2019.
- [2] Filip Biljecki, Jantien Stoter, Hugo Ledoux, Sisi Zlatanova et Arzu Çöltekin. Applications of 3d city models : State of the art review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4):2842–2889, 2015.
- [3] Curtis W Chen et Howard A Zebker. Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization. *JOSA A*, 18(2): 338–351, 2001.
- [4] Ke Chen, Jiangtao Xi et Yanguang Yu. Fast quality-guided phase unwrapping algorithm for 3d profilometry based on object image edge detection. Dans *2012 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pages 64–69. IEEE, 2012.
- [5] Zhaohua Chen, Jinfei Wang et Xiaodong Huang. Land subsidence monitoring in

greater vancouver through synergy of insar and polarimetric analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 44(3):202–214, 2018.

- [6] Mario Costantini. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 36(3):813–821, 1998.
- [7] UN Desa. World population prospects : the 2010 revision, highlights and advance tables. Rapport technique, Working Paper No ES/P/WP. 220. New York : United Nations, Department of . . . , 2011.
- [8] Dennis C Ghiglia et Louis A Romero. Minimum lp-norm two-dimensional phase unwrapping. *JOSA A*, 13(10):1999–2013, 1996.
- [9] Richard M Goldstein et Charles L Werner. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical research letters*, 25(21):4035–4038, 1998.
- [10] Richard M Goldstein, Howard A Zebker et Charles L Werner. Satellite radar interferometry : Two-dimensional phase unwrapping. *Radio science*, 23(4):713–720, 1988.
- [11] Jong-Sen Lee, Konstantinos P Papathanassiou, Thomas L Ainsworth, Mitchell R Grunes et Andreas Reigber. A new technique for noise filtering of sar interferometric phase images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(5):1456–1465, 1998.
- [12] Qingliang Li, Chunyu Bao, Jiashi Zhao et Zhengang Jiang. A new fast quality-guided flood-fill phase unwrapping algorithm. Dans *J Phys Conf Ser*, volume 1069, page 012182, 2018.
- [13] Yan Man, Liu Goulin et Hao Huadong. Comparison among quality maps applying in phase unwrapping for different terrain. Dans *2010 International Conference on Computational and Information Sciences*, pages 804–807. IEEE, 2010.
- [14] Issaak Parcharidis, Sotiris Kokkalas, Ioannis Fountoulis et Michael Foumelis. Detection and monitoring of active faults in urban environments : time series interfe-

- rometry on the cities of patras and pyrgos (peloponnese, greece). *Remote Sensing*, 1(4):676–696, 2009.
- [15] Antonio Pepe et Fabiana Calò. A review of interferometric synthetic aperture radar (insar) multi-track approaches for the retrieval of earth’s surface displacements. *Applied Sciences*, 7(12):1264, 2017.
- [16] Umut Güneş Sefercik. Productivity of terrasars-x 3d data in urban areas : A case study in trento. *European Journal of Remote Sensing*, 46(1):597–612, 2013.
- [17] Pei Wang, Bing-Chen Zhang et Yan-Fei Wang. An anisotropic gaussian filter for noise filtering of insar interferogram. Dans *2006 CIE International Conference on Radar*, pages 1–4. IEEE, 2006.
- [18] Samantha Wittke, Kirsi Karila, Eetu Puttonen, Antti Hellsten, Mikko Jussi Santeri Auvinen, Mika Karjalainen et al. Extracting urban morphology for atmospheric modeling from multispectral and sar satellite imagery. Dans *ISPRS Hannover Workshop : HRIGI 17–CMRT 17–ISA 17–EuroCOW 17 6–9 June 2017, Hannover, Germany*. ISPRS, 2017.
- [19] Fulong Wu et Christopher J Webster. Simulating artificial cities in a gis environment : urban growth under alternative regulation regimes. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(7):625–648, 2000.
- [20] Gang Xu, Yandong Gao, Jin-wei Li et Mengdao Xing. Insar phase denoising : A review of current technologies and future directions. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020.
- [21] Hanwen Yu, Yang Lan, Zhihui Yuan, Junyi Xu et Hyongki Lee. Phase unwrapping in insar : A review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 7(1):40–58, 2019.

CHAPITRE 2

INTERFÉROMÉTRIE RADAR : UN APERÇU

L'interférométrie RSO et son application pour générer des modèles numériques d'altitude ou des cartes de déformation de la croûte terrestre sont traitées dans un grand nombre d'ouvrages [11, 46, 54, 74]. Nous nous concentrerons ici sur les étapes de traitement des données RSO interférométriques pour l'extraction de l'information d'intérêt à titre de référence pour les chapitres subséquents. Notre accent sera mis sur l'état de l'art dans les deux domaines d'intérêt dans cette recherche, à savoir le filtrage des phases interférométriques ainsi que le déroulement des phases.

2.1 Les mesures d'un RSO

Un RSO génère ses données par balayage. Une ligne de balayage correspond à une impulsion émise par l'antenne le long de la trajectoire de vol avec une certaine fréquence de répétition des impulsions (FRI). Compte tenu des dimensions de l'antenne à bord d'un satellite et l'altitude orbitale du satellite, la fauchée de balayage est large de plusieurs kilomètres (direction azimutale) et longue de plusieurs dizaines de kilomètres (direction transversale ou des portées). Le RSO dispose les mécanismes appropriés d'échantillonnage des signaux de retour captés par l'antenne (radar monostatique) afin de repérer les objets à l'intérieur de la fauchée en fonction de leur distance du radar ainsi que leur fréquence Doppler. Les deux composantes du signal, en phase I (partie réelle) et en quadrature de phase Q (partie imaginaire) sont mesurées. En d'autres mots par ligne de balayage des matrices des signaux sont générées. Le traitement post-acquisition d'un grand nombre de matrices successives par des processeurs spécialisés permet de simuler des antennes longues de plusieurs kilomètres et ainsi de générer des images avec des lignes de balayage de largeur métrique au lieu de kilométrique. Les images sont en format SLC (Single Look Complex) avec les deux composantes par pixel : en phase et en quadrature de phase. Chaque pixel est localisé selon ses coordonnées zéro Doppler et

portée oblique. La figure 2.1 donne un exemple fictif avec une antenne de 8 m et d'une fauchée large de 2 km. Chaque objet est vu dans un grand nombre de lignes de balayages successives. Tandis que sa distance du radar reste la même, sa fréquence Doppler n'est pas la même d'une ligne de balayage à l'autre. Le traitement post-acquisition des matrices des signaux permet de reconstituer un pixel de largeur théorique en azimuth de la moitié de la largeur de l'antenne. Concernant la résolution dans la direction des portées elle est :

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (2.1)$$

où c est la vitesse de la lumière, B est la largeur de bande de l'impulsion modulée en fréquence (« Chirp »).

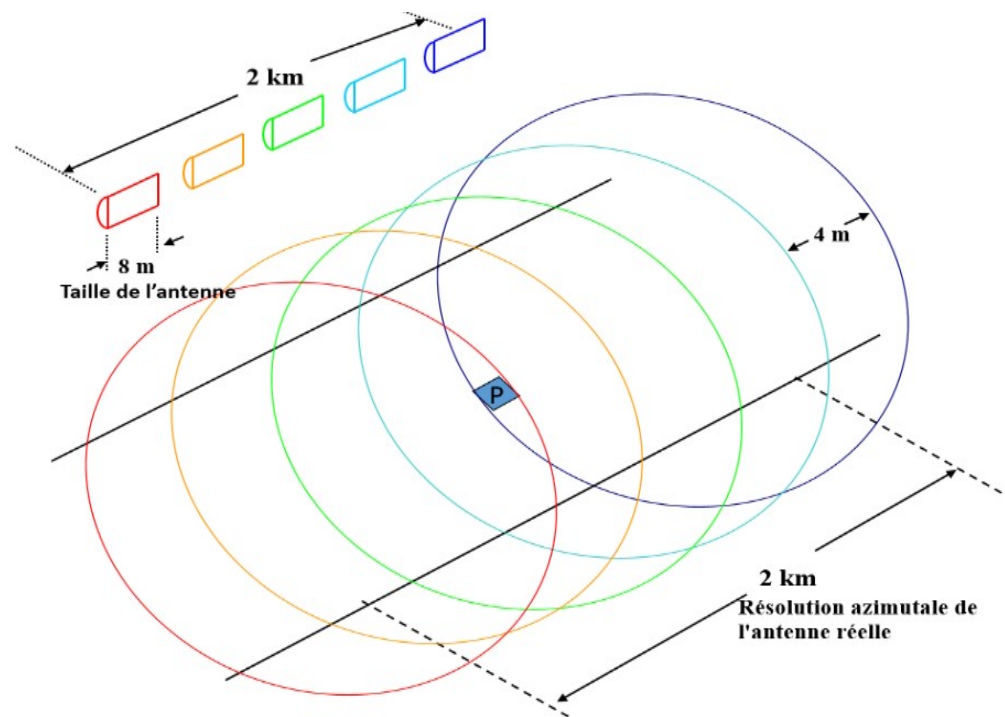


Figure 2.1 : Principe du radar à synthèse d'ouverture (SAR)

Une fois les données traitées, nous pouvons générer des images en amplitude (ou en puissance) et des phases en nous servant des composantes I et Q des signaux :

$$Amplitude = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (2.2)$$

$$Puissance = I^2 + Q^2 \quad (2.3)$$

$$Phase = \phi = \arctan(Q/I) \quad (2.4)$$

L'amplitude est l'information de l'image RSO la plus utilisée. Elle représente la réflectivité du sol et dépend du coefficient de rétrodiffusion de la cible qui est fonction de nombreux paramètres, incluant les paramètres de fonctionnement du RSO et les paramètres propres à la cible. Les paramètres de fonctionnement sont la longueur d'onde (ou la fréquence), la polarisation et l'angle d'incidence. Les paramètres des cibles sont la géométrie (de micro à macro) ainsi que les propriétés diélectriques.

La phase est mesurée modulo 2π . Fondamentalement, elle est une mesure très fine du trajet aller-retour des ondes :

$$\phi_{trajet} = \frac{4\pi}{\lambda} R \quad (2.5)$$

avec λ la longueur d'onde du radar et R la portée. Les cibles, selon leurs caractéristiques de diffusion, peuvent introduire des délais dans le trajet du signal [35]. Tenant compte de ce déphasage, ϕ_{dif} , on peut écrire :

$$\phi = \phi_{trajet} + \phi_{dif} \quad (2.6)$$

De ce fait, la phase revêt un caractère aléatoire et elle est inutilisable avec une seule image. C'est seulement en comparaison avec la phase d'une autre image que cette mesure est exploitable comme démontré pour la première fois par Graham en 1974 [35]. C'est la technique interférométrique (InSAR). Comme mentionné dans le précédent chapitre, dans cette recherche nous nous sommes intéressés à deux applications de cette technique : la construction des modèles numériques d'altitude [75] et la cartographie des déformations de surface qui peuvent être dues à des processus naturels, comme les tremblements de terre [47, 59], les volcans [4, 50], ainsi que des processus anthropiques,

comme l'affaissement causé par l'extraction des eaux souterraines [58, 61] et l'activité minière [53]. La section 2.2 est dédiée aux principes d'interférométrie dans le cas de ces deux applications, la section 2.3 présente les étapes de mise en application de l'interférométrie et la section 2.4 présente l'état de l'art dans les deux domaines d'intérêt de cette recherche, le filtrage de l'interférogramme et le déroulement de phase.

2.2 Principes d'application de la technique interférométrique

L'application d'InSAR à partir des satellites se fait toujours avec des images acquises avec un certain laps de temps entre acquisitions (InSAR à passage répété). Dans le cas de la cartographie des déformations de surface, l'espacement dans le temps c'est une condition nécessaire. Cet espacement peut cependant nuire à la construction des modèles numériques d'altitude.

2.2.1 Création des modèles numériques d'altitude (MNA)

Les conditions d'acquisition de la paire d'images satellites RSO pour la création d'un MNA sont illustrées par la Figure 2.2. Lors des deux passages du satellite, les capteurs se trouvent, en principe dans le même plan, mais la cible est observée selon des angles légèrement différents. Sur cette figure B_{\perp} est la ligne de base perpendiculaire (distance orthogonale séparant les deux positions successives du satellite), R est la distance entre le capteur et la cible, α est l'angle d'obliquité de la ligne de base, θ est l'angle d'incidence, et Δ_h est hauteur de la cible. Les équations 2.7 à 2.11 montrent le principe du calcul de la hauteur d'un point par rapport à une surface de référence, le plus souvent l'ellipsoïde terrestre, par la différence des phases (en supposant que le déphasage ϕ_{dif} de l'équation 2.6 est constant d'une acquisition à l'autre) [5].

$$\Delta_h = H - R \cos \theta \quad (2.7)$$

$$\Delta R \approx -B \sin(\theta - \alpha) \quad (2.8)$$

$$\phi = \phi_{trajet1} - \phi_{trajet2} = \frac{4\pi}{\lambda}(R - (R + \Delta R)) = -\frac{4\pi}{\lambda}(\Delta R) \quad (2.9)$$

$$\frac{\lambda \phi}{4\pi B} = \sin(\theta - a) \implies \theta = a - \sin^{-1}\left(\frac{\lambda \phi}{4\pi B}\right) \quad (2.10)$$

$$\Delta_h = H - R \cos\left[a - \sin^{-1}\left(\frac{\lambda \phi}{4\pi B}\right)\right] \quad (2.11)$$

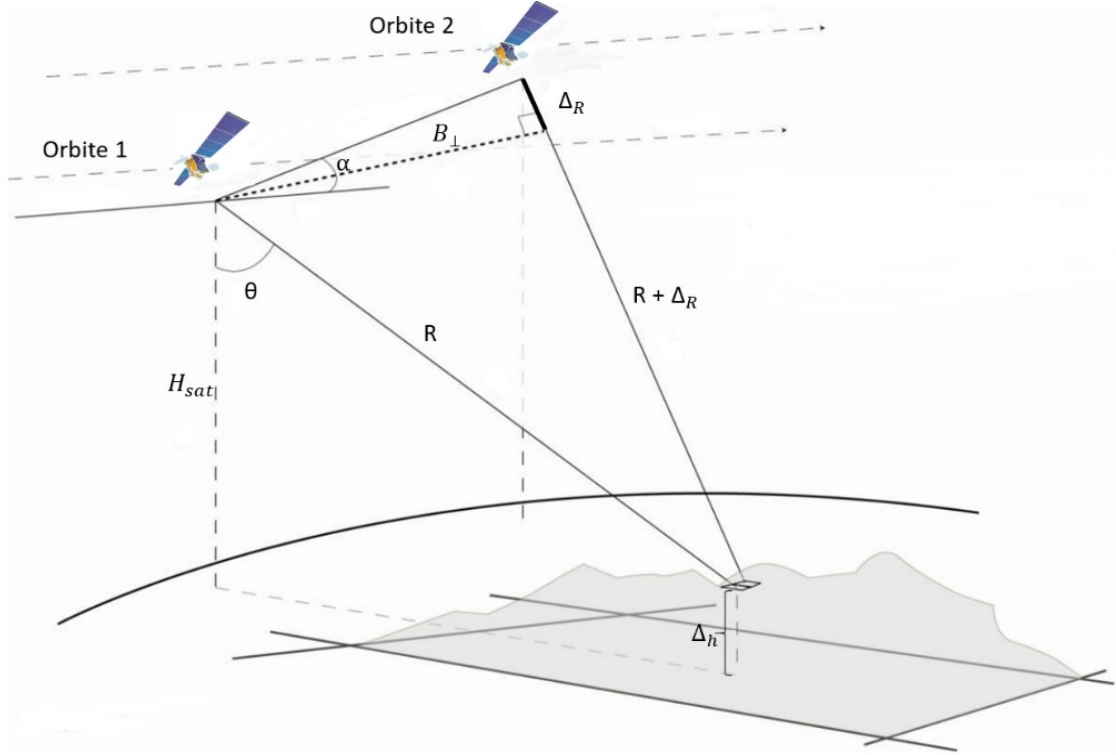


Figure 2.2 : Géométrie d'acquisition de la paire interférométrique d'images

Dans l'équation 2.11, tous les paramètres peuvent être estimés à partir des données orbitales et la géométrie d'acquisition des deux images, à l'exception de la phase interférométrique. Son calcul nécessite l'exécution d'une série d'opérations qui seront décrites dans la section 2.3.

2.2.2 Création des cartes de déformation de surface

Lorsque la paire d'images est acquise avant et après la présence d'un mouvement de la surface, la différence de phase est fonction de la magnitude de ce mouvement. Ainsi la phase interférométrique peut s'écrire [48] :

$$\phi_{depl} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{depl} \quad (2.12)$$

où ΔR_{depl} est la projection dans la direction de la portée du vecteur du déplacement de la surface. Cependant, comme nous l'avons vu dans la section précédente, la phase interférométrique varie aussi en fonction de la topographie. Pour pouvoir minimiser cet effet, il faut des paires d'images avec une ligne de base pratiquement nulle. La section suivante présente les étapes d'application de cette technique.

2.3 Étapes de la technique interférométrique : aperçu

Les principales étapes pour générer les produits interférométriques sont les suivantes :

1. Sélection des paires interférométriques
2. Recalage des images interférométriques
3. Filtrage de la bande passante commune en portée et en azimuth
4. Génération de l'interférogramme et de l'image de cohérence
5. Prise en compte des différents facteurs altérant les phases interférométriques
6. Déroulement de phase interférométrique
7. Conversion des phases en hauteurs ou en mouvements de la croûte terrestre

2.3.1 Sélection des paires interférométriques

Des critères qui ont trait aux conditions d'acquisition des paires interférométriques sont utilisés en premier lieu afin de choisir la paire interférométrique. Ainsi : (a) les images doivent être acquises selon les mêmes conditions (mode, angles de visée, polarisation, segment de l'orbite); (b) les polarisations parallèles sont préférables car le rapport signal/bruit est plus fort que dans le cas des polarisations croisées; (c) en milieu

urbain, particulièrement lorsque la topographie est accidentée, il est préférable d'utiliser des angles d'incidence dans l'intervalle entre environ 25° et 50° afin d'éviter le repliement et l'inversion (angles d'incidence profonde) et les ombrages (angles d'incidence à rasage) qui altèrent les phases (discontinuités); (c) il faut éviter des conditions atmosphériques variables lors des acquisitions de la paire d'images; et (d) dans le cas de production des MNS il est préférable d'utiliser des paires acquises dans un court laps de temps pendant la même saison.

Plusieurs logiciels offrent la possibilité de calcul approximatif des caractéristiques d'une paire interférométrique spécifique qui sont utilisées comme critères de base pour le choix d'une paire interférométrique. Nous l'avons déjà mentionné, une telle caractéristique est la longueur de la ligne de base. Pour la production d'un MNS cette longueur doit atteindre quelques centaines des mètres afin de maintenir une bonne sensibilité de l'interférogramme aux variations des altitudes. Pour les applications de l'interférométrie différentielle il est important à avoir une ligne de base quasi-nulle afin de minimiser l'impact du relief topographique sur les phases. Dans le cas de la production d'un MNS on considère comme longueur de la ligne de base perpendiculaire la moitié (certains parlent du tiers) de la longueur de ligne de base dite « critique ». Cette dernière, où il y a décorrélation complète des phases, se chiffre habituellement à quelques milliers de mètres. Pour des résolutions en portée fines, Bamler et Hartl [8] présentent le calcul théorique de cette ligne de base critique.

La hauteur d'ambiguïté est la différence d'altitude entre deux points appartenant à deux franges voisines [13]. Elle est définie par l'équation suivante (voir figure 2.2) :

$$h_{amb} = -\frac{\lambda R \sin \theta}{2B_{\perp}} \left(\frac{m}{frange} \right) \quad (2.13)$$

C'est un autre critère utilisé pour le choix de la paire appropriée pour la production d'un MNS en comparaison à la résolution hypsométrique souhaitée.

2.3.2 Recalage

Les images RSO de la paire interférométrique ne sont pas acquises exactement sous de mêmes conditions. Ceci nécessite un traitement afin de les replacer dans une géométrie commune pour qu'elles soient superposables. Cette étape de recalage est essentielle pour la détermination de la différence de phase et pour la réduction du bruit. L'une des images est considérée comme image de référence (ou image maîtresse) et l'autre comme image dépendante (ou image esclave). L'image dépendante subit alors une transformation géométrique pour qu'elle soit compatible à l'image de référence. Dans le cas idéal, tous les réflecteurs élémentaires qui ont contribué à la phase d'un pixel de l'image de référence se trouvent dans le pixel qui lui correspond dans l'image dépendante recalée.

Cette transformation géométrique se fait en deux étapes : le recalage grossier et le recalage fin. Dans la première étape, les translations moyennes entre les deux images selon les deux axes (portées et azimuts) sont estimées et appliquées à l'image dépendante. L'exactitude de recalage est de 1 à 2 pixels, ce qui rend plus efficace l'étape du recalage fin. Le recalage fin s'effectue en définissant, par moindres carrées, les coefficients des fonctions polynomiales de bas degré pour la mise en congruence de l'image dépendante et de l'image de référence. Ceci se fait à l'aide d'une série des pixels correspondants sur les deux images localisés automatiquement selon différentes méthodes [10, 43]. À titre d'exemple, les pixels à l'intérieur de petites fenêtres, selon une grille régulière, dont l'intensité maximise la corrélation croisée normalisée et cette corrélation dépasse un certain seuil, sont retenus comme pixels correspondants. Selon une autre méthode [10], de petites zones sont définies à travers l'image de référence à partir desquelles des interférogrammes sont construits en modifiant la translation de la zone entière sur l'image dépendante. La translation qui maximise la cohérence tout en dépassant un seuil de la valeur de cohérence est finalement retenue.

Pour que le recalage soit accepté, il doit permettre la mise en congruence des deux images avec une exactitude d'une fraction de pixel. Souvent l'exactitude acceptée est moins que le dixième du pixel [43]. D'autres algorithmes développés récemment peuvent atteindre une exactitude de l'ordre de 1/1000ème du pixel [49, 56]. Pour compléter le re-

calage, la dernière opération consiste à estimer les valeurs complexes de l'image dépendante recalée par interpolation des valeurs complexes d'origine (rééchantillonnage). Différentes techniques sont proposées comme l'interpolation bilinéaire, la convolution cubique et la convolution $\sin x/x$ tronquée. Cette dernière approche est souvent conseillée.

2.3.3 Filtrage en portée et en azimuth

Un traitement optionnel, avant la création de l'interférogramme, est le filtrage dit de la bande passante commune en portée et en azimuth. L'intérêt d'intervenir en portée est pour minimiser les décorrélations des signaux dus au décalage fréquentiel (« chirp ») pour les mêmes zones causé par des angles d'incidence différents [37, 70]. Dans le cas des azimuths, il y a un décalage de la bande passante de Doppler à cause d'un angle de strabisme (squint) du faisceau entre les deux images. Ainsi ce n'est pas la même zone exactement qui est visualisée sur les deux images. Ce décalage fréquentiel est moins important que celui en portée. Ferretti et al. [27] présentent en détail le modus operandi pour effectuer ce type de filtrage.

2.3.4 Formation de l'interférogramme et de l'image de cohérence

Après le recalage, l'interférogramme est généré en multipliant pixel par pixel le signal complexe de l'image de référence par le conjugué complexe du signal de l'image dépendante :

$$s_{inter} = s_{ref} s_{dep}^* = |A_{ref}| |A_{dep}| e^{-j(\phi_{ref} - \phi_{dep})} = |A_{ref}| |A_{dep}| e^{-j\phi} \quad (2.14)$$

La phase interférométrique (relative) peut alors être extraite à partir de la relation suivante :

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\Im(s_{inter})}{\Re(s_{inter})} \quad (2.15)$$

L'interférogramme est constitué de « franges », chacune correspond à un tour complet ou cycle de la phase ($-\pi$ et $+\pi$ rad). Ainsi pour arriver aux calculs des altitudes ou

des déplacements des surfaces nous avons besoin de la phase interférométrique absolue. En effet la phase est une fonction continue et des multiples entiers de 2π doivent être ajoutés ou retranchés à chaque frange interférométrique. C'est l'étape cruciale en interférométrie, le déroulement des phases.

L'image de cohérence est générée en même temps que l'interférogramme. Elle mesure la similitude entre les données des deux images RSO [8, 76]. L'image de cohérence est largement utilisée dans le cadre des traitements interférométriques [9] ou comme un canal d'information au même titre que les canaux d'amplitude dans différentes applications des images RSO comme la classification des occupations du sol [55] ou pour la détection des changements [29].

La cohérence est toujours un nombre compris entre 0 et 1. Des valeurs de cohérence élevées signifient que les deux images sont identiques, y compris la distribution statistique du bruit de chatoiement. Cela n'est possible que si les cibles au sol n'ont pas changé entre les deux acquisitions et si les conditions géométriques des images sont très proches. Une faible cohérence signifie une forte décorrélation entre les deux images. Cette décorrélation est causée par un ensemble des facteurs tel qu'expliqué par la suite.

2.3.5 Traitements spéciaux de l'interférogramme

La phase interférométrique d'un pixel quelconque de l'interférogramme est la somme des contributions des différents facteurs [37] :

$$\phi = \phi_{topo} + \phi_{vise} + \phi_{def} + \phi_{atm} + \phi_{bruit} \quad (2.16)$$

où ϕ_{topo} est la contribution due à la topographie de surface ; ϕ_{vise} est la contribution de « surface plate », due aux variations de l'angle de visée du capteur le long de la fauchée du RSO ; ϕ_{def} représente la phase due aux déformations de surface entre les deux passages du satellite ; ϕ_{atm} est la phase due aux variations de l'état de l'atmosphère d'un passage à l'autre du satellite ; et ϕ_{bruit} comprend l'ensemble des contributions dues aux variations de l'état de la surface d'un passage à l'autre du satellite ainsi que de

l'instrument de mesure. Les contributions ϕ_{vise} , ϕ_{atm} , ϕ_{bruit} doivent être éliminées ou tout au moins leur impact minimisé peu importe l'application d'InSAR. L'élimination de ces contributions est revue par la suite. Finalement selon l'application l'une ou l'autre des contributions ϕ_{topo} et ϕ_{def} doit être éliminée comme nous le verrons plus loin.

2.3.5.1 Contribution de la « terre plate »

La contribution de la « terre plate » se manifeste par une rampe de phases parallèle à la direction azimutale qui, comme mentionné, est créée par les variations de l'angle de visée du capteur le long de la fauchée du RSO. Les informations sur les orbites permettent d'estimer la trajectoire du satellite et donc de calculer une rampe de phases théorique afin de l'éliminer de l'interférogramme. Cette opération est appelée « aplatissement de l'interférogramme » [37]

2.3.5.2 Contribution de l'atmosphère

La précision des mesures InSAR, en particulier dans le cas des mesures de déplacement du sol, est considérablement affectée par un retard de phase supplémentaire causé par l'atmosphère. Des études détaillées sur les différents effets atmosphériques sur le traitement InSAR sont présentées dans [24, 27, 44]. Pour les capteurs RSO, le retard atmosphérique est largement dû aux variations spatiales et temporelles de la vapeur d'eau dans la couche troposphérique et du nombre d'électrons libres dans la couche ionosphérique. La contribution de phase de ces couches est proportionnelle à la longueur d'onde du radar. Par exemple, les courtes longueurs d'onde comme la bande C sont plus affectées par la troposphère, alors que l'effet de l'ionosphère est presque négligeable. Inversement, les longueurs d'onde plus longues, comme la bande L ou P, sont principalement affectées par l'ionosphère, alors que l'effet de la couche troposphérique est presque négligeable. Pour éliminer la contribution de l'atmosphère sur la phase interférométrique, il faut éviter l'utilisation des images acquises à des conditions météorologiques adverses comme les fortes pluies, la neige, des variations des concentrations de la vapeur d'eau dans la troposphère, des variations de la concentration électronique dans l'ionosphère ou

les journées très chaudes, lesquelles sont souvent accompagnées d'un haut taux d'humidité de l'air. Les acquisitions effectuées le soir (en orbite ascendante) et durant la même saison sont moins affectées par les effets atmosphériques [27].

2.3.5.3 Contribution du bruit

Comme mentionné, ce facteur peut être d'origine environnementale ou d'origine instrumentale. Dans le premier cas la présence d'un volume comme une canopée végétale, les changements dans les conditions de la surface entre les deux acquisitions (ex. variation de l'humidité des sols) peuvent contribuer au bruit interférométrique. Ce bruit est aléatoire et son effet se remarque à la fois sur l'interférogramme et sur l'image de cohérence. La longueur d'onde peut aussi jouer un rôle dans la manifestation de ce bruit. À titre d'exemple la diffusion volumique affecte plus la phase interférométrique avec des images acquises en bande L ou P qu'en bande X ou C, à cause de leur plus forte pénétration dans un volume [76].

Dans le cas du bruit instrumental nous pouvons citer le bruit thermique du système qui dépend principalement du rapport signal/bruit (SNR) [76]. Ce rapport signal/bruit est fonction non seulement des caractéristiques du système, mais aussi de la réflectivité du sol qui est déterminée par les caractéristiques de la surface comme la rugosité, la pente et la teneur en humidité.

L'élimination de la contribution du bruit dans les phases interférométriques se fait par filtrage, un des axes principaux de notre recherche. Un aperçu de l'état de l'art du filtrage est donné dans la section 2.5.1.

2.3.6 Déroulement de phase

La phase interférométrique, qui peut être mesurée seulement en modulo 2π , rend la détermination de la phase absolue nécessaire. Soit $\phi_{mesurable}$ la phase mesurée et $\phi_{absolue}$ la phase absolue recherchée, le déroulement de phase consiste à trouver pour tous les points de l'image, l'entier positif n tel que $\phi_{absolue} = 2n\pi + \phi_{mesurable}$. Dans le cas monodimensionnel et sous la contrainte de la continuité, il existe une solution unique à une

translation près au problème posé : la phase réelle est l'intégrale de la pseudo-dérivée de la phase mesurée le long du chemin reliant deux sauts de phase. Cependant, dans le cas d'images 2D réelles bruitées, l'unicité de la solution n'est plus assurée pour plusieurs raisons dont, le repliement de phase, le bruit, la discontinuité, et les points dits résidus où la phase corrigée en ce point n'est pas la même selon le sens de parcours du chemin d'intégration.

Le déroulement de phase est le second axe de développement de notre recherche. Nous donnerons un aperçu de l'état de l'art dans la section 2.5.2.

2.3.7 Conversion des phases

2.3.7.1 Phases en altitudes

Si l'on considère que toutes les sources de bruit ont été prises en compte et que le déplacement du sol est négligeable, la phase déroulée n'est alors que fonction de la topographie. Nous pouvons ainsi inverser l'équation suivante pour calculer l'élévation d'un pixel par rapport à une surface de référence [27] :

$$\phi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{R \sin \theta} \Delta_h \quad (2.17)$$

Ce calcul nécessite l'estimation précise de la ligne de base perpendiculaire. Des points de contrôle dont l'élévation et leur position sur l'interférogramme sont connues sont nécessaires. Ces points peuvent provenir, par exemple, d'un MNA projetée selon la géométrie de RSO. En introduisant l'élévation de ces points dans l'équation 2.17, il est possible d'estimer la ligne de base perpendiculaire localement. En utilisant plusieurs points de contrôle, une ligne de base perpendiculaire peut être définie globalement (par moindres carrés).

L'usage de l'équation 2.17 avec la ligne de base ainsi calculée, permet de générer un MNS avec la géométrie RSO (portée oblique, azimuth). Il est possible d'utiliser les données des orbites pour ériger un système d'équations permettant de passer de la géométrie RSO à la géométrie d'une référence cartographique. Ceci implique le rééchantillonnage

des valeurs de hauteur à la résolution spatiale souhaitée du MNS.

La qualité de la conversion des phases en hauteur dépend du niveau de bruit dans l'interférogramme et de l'étape de déroulement de phase. Les limitations de cette technique sont dues au décalage temporel entre les acquisitions, et aux effets de relief comme l'inversion et le raccourcissement de la pente, et l'effet de l'ombrage qui peuvent amener à une perte de la cohérence surtout dans les zones avec des reliefs importants [36].

2.3.7.2 Phases en déformations de surface

Dans la section 2.2.2 nous avons mentionné que pour produire des cartes de déformation précises il nous faut éliminer l'influence de la topographie en se servant d'une paire interférométrique avec une ligne de base pratiquement nulle. Souvent, ceci n'est pas possible et des techniques sont disponibles pour minimiser l'impact de la composante topographique sur les différences de phase. Le plus souvent, on simule la composante topographique à l'aide d'un modèle numérique d'altitude existant de la région.

La limitation principale de cette technique est qu'elle mesure la composante du mouvement du sol dans la direction de la portée. Ceci est bien illustré par la figure 2.3. Ainsi, plus le mouvement réel de la surface du sol est proche de la direction de la portée, plus mouvement mesuré et mouvement réel sont proches (figure 2.3 à gauche). En d'autres circonstances, le mouvement mesuré peut différer significativement du mouvement réel. Une technique pour remédier à ce problème est de mesurer le mouvement selon les deux segments d'orbite (descendant et ascendant). Cette technique n'a pas été appliquée dans cette recherche.

Comme dans le cas de la production d'un MNS, les effets atmosphériques sur le signal, peuvent causer des erreurs dans les mesures de DInSAR. Diverses techniques ont été proposées pour améliorer les résultats par rapport à la DInSAR classique tenant compte de l'atmosphère et d'autres sources de bruit [20, 38]. Ces techniques n'ont cependant pas été appliquées dans cette recherche.

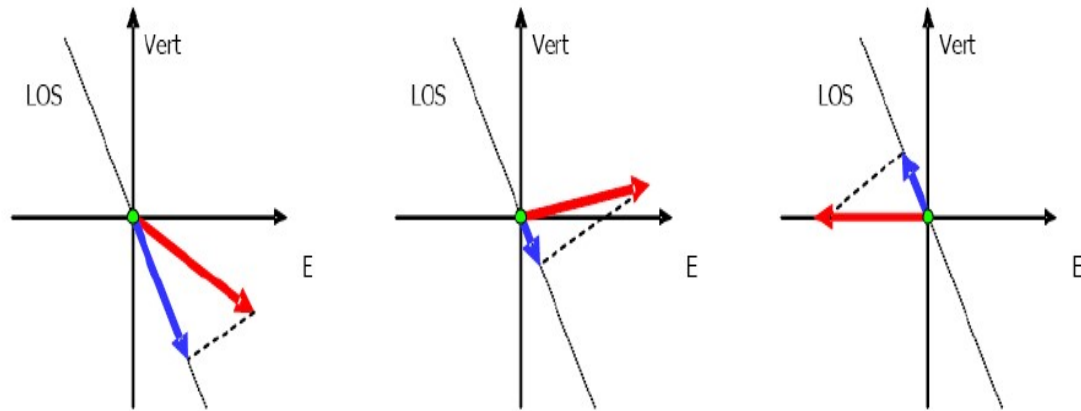


Figure 2.3 : Mouvement mesuré en DInSAR (vecteur bleu) dans la direction de la portée (LOS= line of sight) et mouvement réel du sol (vecteur rouge) (source : Anonymous (2010) Interferometric Synthetic Aperture Radar. [http ://www.risknet-alcotra.org/rna/allegati/insar-manual-20101008-468.pdf](http://www.risknet-alcotra.org/rna/allegati/insar-manual-20101008-468.pdf), consulté juin 2020)

2.4 Algorithmes de filtrage et de déroulement de phases : état de l'art

2.4.1 Filtrage de l'interférogramme

La présence du bruit en interférométrie dégrade sérieusement la qualité de l'interférogramme. Pour réduire l'effet du bruit, un filtre multi-vues et/ou un filtre de lissage de l'interférogramme sont souvent utilisés. L'utilisation d'un filtre multi-vues réduit, cependant, la résolution spatiale tandis qu'un filtre de lissage peut éliminer les informations sur les détails fins de la texture dans un interférogramme. Un filtre de phase idéal devrait donc être capable de réduire le bruit de phase tout en préservant les variations du gradient de phase [41]. Plusieurs méthodes de filtrage d'interférogrammes ont été proposées dans la littérature. Elles peuvent être classées en deux catégories selon le domaine du traitement : spatial ou fréquentiel.

2.4.1.1 Filtres dans le domaine spatial

Les filtres de lissage les plus simples dans le domaine spatial, comme les filtres moyen, médian, ou gaussien, ne tiennent pas compte de la variabilité spatiale dans la scène [77]. Pour bien exploiter l'information spatiale, les filtres adaptatifs utilisent les propriétés statistiques de la scène à restaurer. Parmi ces filtres, celui de Lee et de ses collaborateurs est souvent appliqué sur les interférogrammes [40]. Leur filtre de type adaptatif comporte seize fenêtres de lissage d'orientations différentes. Pour chaque pixel de l'interférogramme, la variance de la phase est évaluée dans chacune de ces fenêtres. La variance minimale de la fenêtre directionnelle est utilisée pour calculer une moyenne pondérée. Des modifications à ce filtre complexe adaptatif ont été proposées, en ajustant les fenêtres directionnelles, pour réduire les pertes de signal tout en minimisant le bruit [14, 69]. Dubois a montré que le calcul du gradient de la phase dans chaque fenêtre directionnelle au lieu de la variance, améliore les résultats de filtrage dans un milieu urbain [25]. Il existe encore de nombreux filtres améliorés basés sur les nouvelles méthodes d'estimation des fréquences locales des franges, telles que la méthode de maximum de vraisemblance [62], la méthode de Trouvé basée sur la variation topographique [65], et la méthode multi- résolution de Cai [12]. L'inconvénient de ces méthodes c'est que la taille et la forme des fenêtres qui peuvent affecter les résultats de filtrage [65, 69].

Les méthodes de filtrage non local ont été aussi proposées. Ils utilisent simultanément les images d'amplitude, de la cohérence et de la phase [6, 21, 78]. L'algorithme le plus connu est celui de NL-InSAR [21]. Ces méthodes sont basées sur un filtre moyen non local de pixels similaires. Deux pixels sont considérés comme similaires si les plages d'images environnantes sont similaires. Cependant, les résultats de ces méthodes dépendent de la façon de mesurer la similitude entre les plages de données [22].

2.4.1.2 Filtres dans Domaine fréquentiel

Dans le domaine fréquentiel, le signal cohérent s'accumule et forme un pic dominant, tandis que la puissance des bruits non corrélés se disperse statistiquement dans différentes directions [26]. Sur la base de cette caractéristique, de nombreux algorithmes

de filtrage ont été développés [9, 26, 33, 57, 60, 64]. Le filtre standard de Goldstein [33] est le plus utilisé pour les applications InSAR vu sa simplicité et sa capacité de réduire le bruit interférométrique en préservant la variation locale de la phase [64]. Ce filtre divise l'interférogramme en petites fenêtres de même taille, le spectre fréquentiel de chacune d'elle est évalué par une transformation de Fourier. Ce spectre est alors multiplié par sa valeur absolue, lissée par un filtre moyen et soumis à une puissance α , comprise entre 0 et 1. Si α égal à 0, il n'y a pas de lissage, le spectre fréquentiel étant multiplié par 1. Pour α égal à 1, le lissage est fort. Pour assurer un équilibre entre la suppression du bruit et la préservation de la phase, Goldstein a considéré α comme étant une constante égale à 0.5. Pour Baran α n'est plus une constante, mais plutôt une variable qui dépend de la cohérence interférométrique [9]. Le filtrage se fait seulement sur les endroits où la cohérence est faible. Dans [60] la valeur de α est estimée à partir des propriétés du signal en utilisant une décomposition en mode empirique. La taille de la fenêtre utilisée peut affecter considérablement les résultats de ces méthodes. Pour résoudre ce problème, une fenêtre avec une taille dynamique qui change selon le niveau de bruit dans l'image est utilisée [26]. Si le niveau de bruit est élevé, la taille de la fenêtre est plus grande. Ces filtres modifiés donnent de meilleurs résultats que le filtre traditionnel de Goldstein. Cependant, ces filtres peuvent entraîner la perte de détails fins dans un interférogramme, en particulier dans les zones avec des franges denses et des textures complexes [26].

Lopez et Fabregas [45] ont proposé une nouvelle approche basée sur les transformés d'ondelettes par paquets avec trois niveaux de décomposition. Leur idée principale consiste à extraire le signal utile de l'image en utilisant un seuil fixe pour tous les coefficients d'ondelettes en sous-bandes. Cependant, les différentes sous-bandes de la transformée en ondelettes ne contiennent ni le même type d'information ni la même dynamique (données utiles dans les bandes basses fréquences et presque du bruit dans les bandes hautes fréquences). Pour contourner cet inconvénient, Abdelfattah et Bouzid [3] ont proposé un nouveau filtre en utilisant un seuil adaptatif basé sur l'image de cohérence au lieu d'un seuil fixe. La cohérence peut donner une idée sur le niveau de bruit, mais dans certains cas, cette cohérence ne peut pas représenter parfaitement l'intensité

et la distribution du bruit de phase [57].

2.4.1.3 Conclusion

La fonction de densité des probabilités pdf du bruit de phase interférométrique est bien connue, et elle basée sur une distribution gaussienne circulaire. De plus, Lee [40] a montré que dans le cas des données multi-vues le bruit de phases suit une distribution de probabilité hypergéométrique, et que l'écart-type du bruit dépend de la cohérence et du nombre de vues. Par conséquent, un noyau gaussien anisotrope (AGK) peut être utilisé pour filtrer l'interférogramme [67]. Ce filtre peut réduire le bruit, tout en conservant les structures importantes de l'image. Différentes approches sont proposées sur la base d'AGK [23, 66]. Deux questions doivent être traitées. L'une est comment construire correctement le noyau du filtre et l'autre est comment estimer avec précision l'orientation des structures de l'image. Dans ce travail, un nouveau filtre d'interférogramme est proposé. Ce filtre est une nouvelle formulation du filtre gaussien anisotrope adaptatif dans le domaine spatial basée sur la fonction de densité de probabilité de bruits de phase et les statistiques locales de l'interférogramme. Cet algorithme est présenté d'une façon détaillée au chapitre quatre.

2.4.2 Déroulement de phase

Différentes méthodes de déroulement de phase ont été proposées [30, 73]. Elles peuvent être classées en fonction de la nature locale ou globale de l'algorithme ou selon les hypothèses faites sur le modèle du signal réel observé.

2.4.2.1 Méthodes locales

Les méthodes locales [17, 28, 34, 42, 68] consistent à intégrer la phase point par point en choisissant un parcours d'intégration sans points ambigus. L'algorithme "Branch Cut" de Goldstein et al. traite les résidus comme source de propagation d'erreur [34]. Tout d'abord, les résidus sont détectés et connectés avec des coupures de branches pour équilibrer leurs charges. Ensuite, le champ de gradient est intégré le long des chemins autour

des coupures de branches à partir des résidus. Les méthodes de croissance de région, supposent que les pixels de haute qualité (par exemple, lorsque la cohérence est élevée) sont moins susceptibles de provoquer une propagation d'erreur, par conséquent, les pixels sont regroupés en régions homogènes du point de vue des sauts de phase [7, 71]. Ces zones homogènes sont utilisées comme indicateur pour suivre les chemins d'intégration. Flynn [28] a développé un algorithme de discontinuité minimum pour trouver la solution qui minimise les discontinuités de phase dans l'interférogramme. Cet algorithme utilise une approche arborescente qui trace des chemins de discontinuités de phase, détecte des boucles et ajoute des multiples de 2π aux valeurs de phase entourées par les boucles. Les méthodes de déroulement de phase guidées par la qualité du pixel "quality-guided flood-fill" (QGFF) utilisent un paramètre de qualité associé à chaque pixel en mesurant la régularité de ce pixel par rapport à son voisinage [17, 42, 68]. Ensuite, le processus de déroulement de phase commence par le pixel qui a la plus haute qualité et continue vers les pixels de qualité inférieure jusqu'au parcours de tous les pixels de l'interférogramme. Même si ces algorithmes essayent d'éviter les pixels ambigus qui sont considérés comme pixels bruités tout au long le parcours d'intégration, la propagation des erreurs de proche en proche en présence de bruit reste le problème principal de ces techniques.

2.4.2.2 Méthodes globales

Les algorithmes suivant une méthode globale s'appliquent en deux étapes. En premier lieu, le déroulement de phase est modélisé par une fonction objective tandis que la deuxième étape est l'optimisation de cette fonction.

Les méthodes des moindres carrés dans leurs formes pondérées et non pondérées sont utilisées font partie des méthodes globales [31, 32, 51, 52]. Les formes non pondérées peuvent être décrites par une équation de Poisson discrète. Il existe diverses techniques pour résoudre cette équation, y compris les transformées de Fourier rapides (FFT) [52], les transformées en cosinus discrètes (DCT) [31] et la technique multi-grille non pondérée [51]. Les résultats ne sont cependant pas très précis, ces méthodes ayant tendance à propager les erreurs plutôt que de les contenir dans un ensemble limité de points [30].

Pour surmonter ce problème, une pondération de la phase peut être utile. Cependant, les algorithmes des moindres carrés pondérés proposés, telles que la méthode d'itération de Picard, la méthode du gradient conjugué préconditionné [31] ou la méthode multi-grille pondérée [51] sont itératifs et moins efficaces que les algorithmes non pondérés. De plus, la précision des résultats dépend essentiellement du masque de pondération utilisé [30].

Costantini a modélisé le problème comme étant un problème des réseaux de flux de coûts minimums (MCF)[19]. En utilisant le fait que les différences de phase des pixels voisins peuvent être estimées avec une erreur potentielle qui est un multiple entier de 2π , il a formulé le problème de déroulement de phase comme étant un problème de minimisation globale avec des variables entières. L'approche MCF s'est révélée stable en ce qui concerne la propagation des erreurs de zones incohérentes aux zones cohérentes. Cependant cet algorithme peut générer des discontinuités de phase lorsque la scène devient très bruitée.

L'algorithme SNAPHU proposé par Chen et Zebker [15, 16] est le plus utilisé parmi les algorithmes de déroulement de phase. Il est déjà implémenté dans les logiciels Geomatica de PCI et SNAP de l'ESA (Agence Spatiale Européenne). Les auteurs ont introduit un modèle statistique basé sur la méthode de maximum de vraisemblance pour estimer la phase absolue. Le problème est ensuite transformé en une fonction de coût qui est résolue par des approches de réseau de flux. Le point faible de cette méthode c'est que la fonction de coût se base sur une modélisation statistique. Vu que la distribution des sauts de phase dans un interférogramme est très arbitraire, une telle solution peut conduire à des résultats irréalistes.

2.4.2.3 Méthodes Hybrides

D'autres travaux proposent une modélisation à priori dans un voisinage local avec une mise en correspondance sous forme de minimisation. Labrousse [39] minimise ainsi une fonctionnelle définissant une erreur par rapport au modèle à priori et une erreur par rapport aux données réelles (interférogramme). Stramaglia [63] propose une minimisation de type recuit simulé de la différence entre la phase mesurée et la phase réelle

estimée. D'autres méthodes intègrent les deux étapes de filtrage et de déroulement de phase dans un modèle Markovien qui combinent efficacement les contraintes locales et les contraintes globales [1, 2, 18].

2.4.2.4 Conclusion

Les méthodes qui exploitent efficacement les contraintes locales et globales peuvent améliorer les résultats de déroulement de phase. Les modèles markoviens [1, 2, 18] combinent efficacement ces contraintes, ils sont basées uniquement sur des hypothèses directes sur le contexte du pixel avec son voisinage. Ils n'ont pas besoin d'une fonction de distribution de probabilité exacte de la phase observée et du terme de bruit. Toutefois, ces modèles souffrent de deux inconvénients majeurs. Le premier est qu'ils ne peuvent pas prendre en compte les erreurs causées par les discontinuités de phase. Le second, est le choix de la méthode d'optimisation à utiliser. Dans ce projet, une nouvelle méthode de déroulement de phase est proposée. Cette méthode exploite efficacement les contraintes locales et globales de l'interférogramme. En effet, les contraintes locales sont modélisées par une nouvelle mesure de qualité. Cette mesure attribue un poids à chaque pixel de l'interférogramme en fonction de deux critères, dont les rapports de saut de phase et le gradient de phase. Le premier paramètre est le rapport entre le nombre de pixels qui présentent un saut de phase avec un pixel central dans une fenêtre coulissante et le nombre total de pixels de cette fenêtre. Le deuxième paramètre calcule l'amplitude du gradient de ce pixel selon l'opérateur de gradient du Boxcar. Alors que les contraintes globales sont modélisées par une fonction de coût qui est définie par la somme des coûts de tous les pixels de l'interférogramme. Cette fonction est minimisée par un algorithme génétique. Selon [2, 72], cet algorithme est capable de converger vers un minimum global à un temps raisonnable. L'algorithme est plus détaillé dans le chapitre cinq.

Bibliographie

- [1] Wajih Ben Abdallah et Riadh Abdelfattah. Mrf model based approach for simultaneous insar phase filtering and unwrapping. Dans *2014 IEEE Geoscience and*

- Remote Sensing Symposium*, pages 33–36. IEEE, 2014.
- [2] Wajih Ben Abdallah et Riadh Abdelfattah. A joint markov random field approach for sar interferogram filtering and unwrapping. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(7):3016–3025, 2016.
 - [3] Riadh Abdelfattah et Aymen Bouzid. Sar interferogram filtering in the wavelet domain using a coherence map mask. Dans *2008 15th IEEE International Conference on Image Processing*, pages 1888–1891. IEEE, 2008.
 - [4] Falk Amelung et Simon Day. Insar observations of the 1995 fogo, cape verde, eruption : Implications for the effects of collapse events upon island volcanoes. *Geophysical Research Letters*, 29(12):47–1, 2002.
 - [5] Michelle Aubrun. Extraction des informations sur la morphologie des milieux urbains par analyse des images satellites radars interférométriques. 2019.
 - [6] Gerald Baier, Cristian Rossi, Marie Lachaise, Xiao Xiang Zhu et Richard Bamler. A nonlocal insar filter for high-resolution dem generation from tandem-x interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(11):6469–6483, 2018.
 - [7] Antonio Baldi. Phase unwrapping by region growing. *Applied optics*, 42(14):2498–2505, 2003.
 - [8] Richard Bamler et Philipp Hartl. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse problems*, 14(4):R1, 1998.
 - [9] Ireneusz Baran, Mike P Stewart, Bert M Kampes, Zbigniew Perski et Peter Lilly. A modification to the goldstein radar interferogram filter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(9):2114–2118, 2003.
 - [10] Lisa Gottesfeld Brown. A survey of image registration techniques. *ACM computing surveys (CSUR)*, 24(4):325–376, 1992.

- [11] Roland Bürgmann, Paul A Rosen et Eric J Fielding. Synthetic aperture radar interferometry to measure earth's surface topography and its deformation. *Annual review of earth and planetary sciences*, 28(1):169–209, 2000.
- [12] Bin Cai, Diannong Liang et Zhen Dong. A new adaptive multiresolution noise-filtering approach for sar interferometric phase images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(2):266–270, 2008.
- [13] Olivier Cavalié. *Mesures InSAR et modélisation de faibles déformations d'origine anthropique (lac Mead, USA) ou tectonique (faille de Haiyuan, Chine)*. Thèse de doctorat, 2007.
- [14] Chin-Fu Chao, Kun-Shan Chen et Jong-Sen Lee. Refined filtering of interferometric phase from insar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(12):5315–5323, 2013.
- [15] Curtis W Chen et Howard A Zebker. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping : intractability and two new algorithms. *JOSA A*, 17(3):401–414, 2000.
- [16] Curtis W Chen et Howard A Zebker. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping : intractability and two new algorithms : erratum. *JOSA A*, 18(5):1192–1192, 2001.
- [17] Ke Chen, Jiangtao Xi et Yanguang Yu. Fast quality-guided phase unwrapping algorithm for 3d profilometry based on object image edge detection. Dans *2012 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pages 64–69. IEEE, 2012.
- [18] Runpu Chen, Weidong Yu, Robert Wang, Gang Liu et Yunfeng Shao. Integrated denoising and unwrapping of insar phase based on markov random fields. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(8):4473–4485, 2013.
- [19] Mario Costantini. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 36(3):813–821, 1998.

- [20] Michele Crosetto, Oriol Monserrat, María Cuevas-González, Núria Devanthéry et Bruno Crippa. Persistent scatterer interferometry : A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115:78–89, 2016.
- [21] Charles-Alban Deledalle, Loïc Denis et Florence Tupin. Nl-insar : Nonlocal interferogram estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(4):1441–1452, 2010.
- [22] Charles-Alban Deledalle, Loïc Denis et Florence Tupin. How to compare noisy patches ? patch similarity beyond gaussian noise. *International journal of computer vision*, 99(1):86–102, 2012.
- [23] Olivier d’Hondt, Laurent Ferro-Famil et Eric Pottier. Local orientation analysis of spatial texture from polarimetric sar data. Dans *IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, volume 2, pages 1236–1239. IEEE, 2004.
- [24] Xiao-li Ding, Zhi-wei Li, Jian-jun Zhu, Guang-cai Feng et Jiang-ping Long. Atmospheric effects on insar measurements and their mitigation. *Sensors*, 8(9):5426–5448, 2008.
- [25] Clémence Dubois, Antje Thiele et Stefan Hinz. Building detection and building parameter retrieval in insar phase images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114:228–241, 2016.
- [26] Qingqing Feng, Huaping Xu, Zhefeng Wu, Yanan You, Wei Liu et Shiqi Ge. Improved goldstein interferogram filter based on local fringe frequency estimation. *Sensors*, 16(11):1976, 2016.
- [27] Alessandro Ferretti, Andrea Monti-Guarnieri, Claudio Prati, Fabio Rocca et D Massonet. Insar principles-guidelines for sar interferometry processing and interpretation, tm-19. *The Netherlands : ESA Publications*, 2007.
- [28] Thomas J Flynn. Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity. *JOSA A*, 14(10):2692–2701, 1997.

- [29] Paolo Gamba, Fabio Dell’Acqua et Giovanna Trianni. Rapid damage detection in the bam area using multitemporal sar and exploiting ancillary data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(6):1582–1589, 2007.
- [30] Dennis C Ghiglia et Mark D Pritt. *Two-dimensional phase unwrapping : theory, algorithms, and software*, volume 4. Wiley New York, 1998.
- [31] Dennis C Ghiglia et Louis A Romero. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods. *JOSA A*, 11(1):107–117, 1994.
- [32] Dennis C Ghiglia et Louis A Romero. Minimum lp-norm two-dimensional phase unwrapping. *JOSA A*, 13(10):1999–2013, 1996.
- [33] Richard M Goldstein et Charles L Werner. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical research letters*, 25(21):4035–4038, 1998.
- [34] Richard M Goldstein, Howard A Zebker et Charles L Werner. Satellite radar interferometry : Two-dimensional phase unwrapping. *Radio science*, 23(4):713–720, 1988.
- [35] Leroy C Graham. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. *Proceedings of the IEEE*, 62(6):763–768, 1974.
- [36] Jan O Hagberg et Lars MH Ulander. On the optimization of interferometric sar for topographic mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(1):303–306, 1993.
- [37] Ramon F Hanssen. *Radar interferometry : data interpretation and error analysis*, volume 2. Springer Science & Business Media, 2001.
- [38] Andrew Hooper. A multi-temporal insar method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16), 2008.
- [39] David Labrousse-Castaing. *Modelisation markovienne pour le deroulement de phases interferometriques sar*. Thèse de doctorat, Nice, 1996.

- [40] Jong-Sen Lee, Konstantinos P Papathanassiou, Thomas L Ainsworth, Mitchell R Grunes et Andreas Reigber. A new technique for noise filtering of sar interferometric phase images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(5): 1456–1465, 1998.
- [41] Hongyu Li, Hongjun Song, Robert Wang, Hui Wang, Gang Liu, Runpu Chen, Xinglin Li, Yunkai Deng et Timo Balz. A modification to the complex-valued mrf modeling filter of interferometric sar phase. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(3):681–685, 2014.
- [42] Qingliang Li, Chunyu Bao, Jiashi Zhao et Zhengang Jiang. A new fast quality-guided flood-fill phase unwrapping algorithm. Dans *Journal of Physics : Conference Series*, volume 1069, page 012182. IOP Publishing, 2018.
- [43] Zhengxiao Li, James Bethel et al. Image coregistration in sar interferometry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37:433–438, 2008.
- [44] Shizhou Liu. Satellite radar interferometry : estimation of atmospheric delay. 2012.
- [45] Carlos Lopez-Martinez et Xavier Fabregas. Modeling and reduction of sar interferometric phase noise in the wavelet domain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(12):2553–2566, 2002.
- [46] Didier Massonnet et Kurt L Feigl. Radar interferometry and its application to changes in the earth’s surface. *Reviews of geophysics*, 36(4):441–500, 1998.
- [47] Didier Massonnet, Marc Rossi, César Carmona, Frédéric Adragna, Gilles Peltzer, Kurt Feigl et Thierry Rabaute. The displacement field of the landers earthquake mapped by radar interferometry. *nature*, 364(6433):138–142, 1993.
- [48] Alberto Moreira, Pau Prats-Iraola, Marwan Younis, Gerhard Krieger, Irena Hajnsek et Konstantinos P Papathanassiou. A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, 1(1):6–43, 2013.

- [49] Pau Prats-Iraola, Rolf Scheiber, Luca Marotti, Steffen Wollstadt et Andreas Reigber. Tops interferometry with terrasar-x. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 50(8):3179–3188, 2012.
- [50] Matthew E Pritchard et Mark Simons. An insar-based survey of volcanic deformation in the southern andes. *Geophysical research letters*, 31(15), 2004.
- [51] Mark D Pritt. Phase unwrapping by means of multigrid techniques for interferometric sar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(3):728–738, 1996.
- [52] Mark D Pritt et Jerome S Shipman. Least-squares two-dimensional phase unwrapping using fft’s. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 32(3):706–708, 1994.
- [53] Daniel Raucoules, Christophe Maisons, Claudie Carnec, Stéphane Le Mouelic, Christine King et Steven Hosford. Monitoring of slow ground deformation by ers radar interferometry on the vauvert salt mine (france) : Comparison with ground-based measurement. *Remote sensing of environment*, 88(4):468–478, 2003.
- [54] Paul A Rosen, Scott Hensley, Ian R Joughin, Fuk K Li, Soren N Madsen, Ernesto Rodriguez et Richard M Goldstein. Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3):333–382, 2000.
- [55] Maurizio Santoro, Jan IH Askne, Urs Wegmuller et Charles L Werner. Observations, modeling, and applications of ers-envisat coherence over land surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(8):2600–2611, 2007.
- [56] Rolf Scheiber, Marc Jäger, Pau Prats-Iraola, Francesco De Zan et Dirk Geudtner. Speckle tracking and interferometric processing of terrasar-x tops data for mapping nonstationary scenarios. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(4):1709–1720, 2014.

- [57] Xiaojin Shi et Yunhua Zhang. Improving goldstein filter by image entropy for insar interferogram filtering. Dans *2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, pages 1–4. IEEE, 2011.
- [58] Gabriela Llanet Siles, Juan Carlos Alcérreca-Huerta, Penélope López-Quiroz et Wolfgang Niemeier. Long term subsidence analysis and soil fracturing zonation based on insar time series modelling in northern zona metropolitana del valle de mexico. *Remote Sensing*, 7(6):6908–6931, 2015.
- [59] Mark Simons, Yuri Fialko et Luis Rivera. Coseismic deformation from the 1999 m w 7.1 hector mine, california, earthquake as inferred from insar and gps observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4):1390–1402, 2002.
- [60] Rui Song, Huadong Guo, Guang Liu, Zbigniew Perski, Huanyin Yue, Chunming Han et Jinghui Fan. Improved goldstein sar interferogram filter based on adaptive-neighborhood technique. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(1): 140–144, 2014.
- [61] Andrew Sowter, Moh Bin Che Amat, Francesca Cigna, Stuart Marsh, Ahmed Athab et Lubna Alshammari. Mexico city land subsidence in 2014–2015 with sentinel-1 iw tops : Results using the intermittent sbas (isbas) technique. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 52:230–242, 2016.
- [62] Umberto Spagnolini. 2-d phase unwrapping and instantaneous frequency estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(3):579–589, 1995.
- [63] Sebastiano Stramaglia, Giovanni Nico, Guido Pasquariello et Luciano Guerriero. Phase unwrapping method based on stochastic relaxation. Dans *Image Processing, Signal Processing, and Synthetic Aperture Radar for Remote Sensing*, volume 3217, pages 4–12. International Society for Optics and Photonics, 1997.
- [64] Zhiyong Suo, Jinqiang Zhang, Ming Li, Qingjun Zhang et Chao Fang. Improved insar phase noise filter in frequency domain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(2):1185–1195, 2015.

- [65] Emmanuel Trouve, J-M Nicolas et Henri Maitre. Improving phase unwrapping techniques by the use of local frequency estimates. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 36(6):1963–1972, 1998.
- [66] Feng Wang, Hongjian You et Xingyu Fu. Adapted anisotropic gaussian sift matching strategy for sar registration. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(1):160–164, 2014.
- [67] Pei Wang, Bing-Chen Zhang et Yan-Fei Wang. An anisotropic gaussian filter for noise filtering of insar interferogram. Dans *2006 CIE International Conference on Radar*, pages 1–4. IEEE, 2006.
- [68] Xian Wang, Suping Fang, Xindong Zhu et Yichao Li. Phase unwrapping of interferometric fringes based on a mutual information quality map and phase recovery strategy. *Optical Engineering*, 57(11):114108, 2018.
- [69] Nan Wu, Da-Zheng Feng et Junxia Li. A locally adaptive filter of interferometric phase images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(1):73–77, 2006.
- [70] Gang Xu, Yandong Gao, Jin-wei Li et Mengdao Xing. Insar phase denoising : A review of current technologies and future directions. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020.
- [71] Wei Xu et Ian Cumming. A region-growing algorithm for insar phase unwrapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1):124–134, 1999.
- [72] Zhang Yan et Xing ZiJian. A hybrid phase unwrapping algorithm based on quality-guided and surface-fitting. Dans *2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics : Applications and Student Innovation Competition (iWEM)*, pages 1–2. IEEE, 2018.
- [73] Hanwen Yu, Yang Lan, Zhihui Yuan, Junyi Xu et Hyongki Lee. Phase unwrapping in insar : A review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 7(1):40–58, 2019.

- [74] Howard A Zebker. Studying the earth with interferometric radar. *Computing in Science & Engineering*, 2(3):52–60, 2000.
- [75] Howard A Zebker, Thomas G Farr, Ronald P Salazar et Timothy H Dixon. Mapping the world’s topography using radar interferometry : the topsat mission. *Proceedings of the IEEE*, 82(12):1774–1786, 1994.
- [76] Howard A Zebker, John Villasenor et al. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 30(5):950–959, 1992.
- [77] Tang Zhi, Li Jingwen et Zhou Yinqing. Analysis on noise reduction method for interferometric sar image. Dans *IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, volume 6, pages 4243–4246. IEEE, 2004.
- [78] Aaron Zimmer et Parwant Ghuman. Cuda optimization of non-local means extended to wrapped gaussian distributions for interferometric phase denoising. *Procedia Computer Science*, 80:166–177, 2016.

CHAPITRE 3

APPLICATION DE L'INSAR EN MILIEU URBAIN

3.1 Production d'un MNS : Cas de l'agglomération de Montréal

3.1.1 Site d'étude

L'agglomération de Montréal (Canada) comprend les îles de Montréal et Bizard (figure 3.1a). Elle couvre un territoire d'environ 500 km² et comprend la Ville de Montréal et 15 autres villes affiliées. La population est de 2 millions d'habitants et les types d'occupations du sol (résidentiel, commercial, industriel, etc.) sont presque partout bien délimités dans l'espace, comme dans toute ville nord-américaine. La topographie n'est pas prononcée à l'exception de Mont-Royal qui culmine à 233 m.

Le site d'étude choisi (zone délimitée par le cadre rouge sur la figure 3.1a) comprend le Mont-Royal et ses environs, entre les longitudes 73°42'W, 73°33'W et les latitudes 45°30'N et 45°29'N. Ce site offre un paysage urbain assez diversifié (Figure 3.1 (b)) [3]. Le Mont-Royal qui culmine à 233 m est couvert de végétation surtout des arbres, sur son flanc sud-est se trouve le centre-ville de Montréal avec ces hauts bâtiments. Le flanc ouest présente la plus grande homogénéité tant au niveau de sa topographie que de son organisation spatiale. Le flanc nord-est est caractérisé par une concentration des parcs et des bâtiments publics. Tandis que, le flanc nord-ouest se présente avec une dominance de grandes structures commerciales et industrielles. Cette diversification spatiale, morphologique, et topographique du paysage du site d'étude permettra de tester les algorithmes d'InSAR sur plusieurs niveaux selon la densité urbaine, les structures des bâtiments et les variations topographiques.

3.1.2 Données utilisées

En suivant les conseils pour le choix d'une paire d'images RSO présentés au chapitre 2, nous avons choisi parmi les images RADARSAT-2 disponibles pour ce projet une

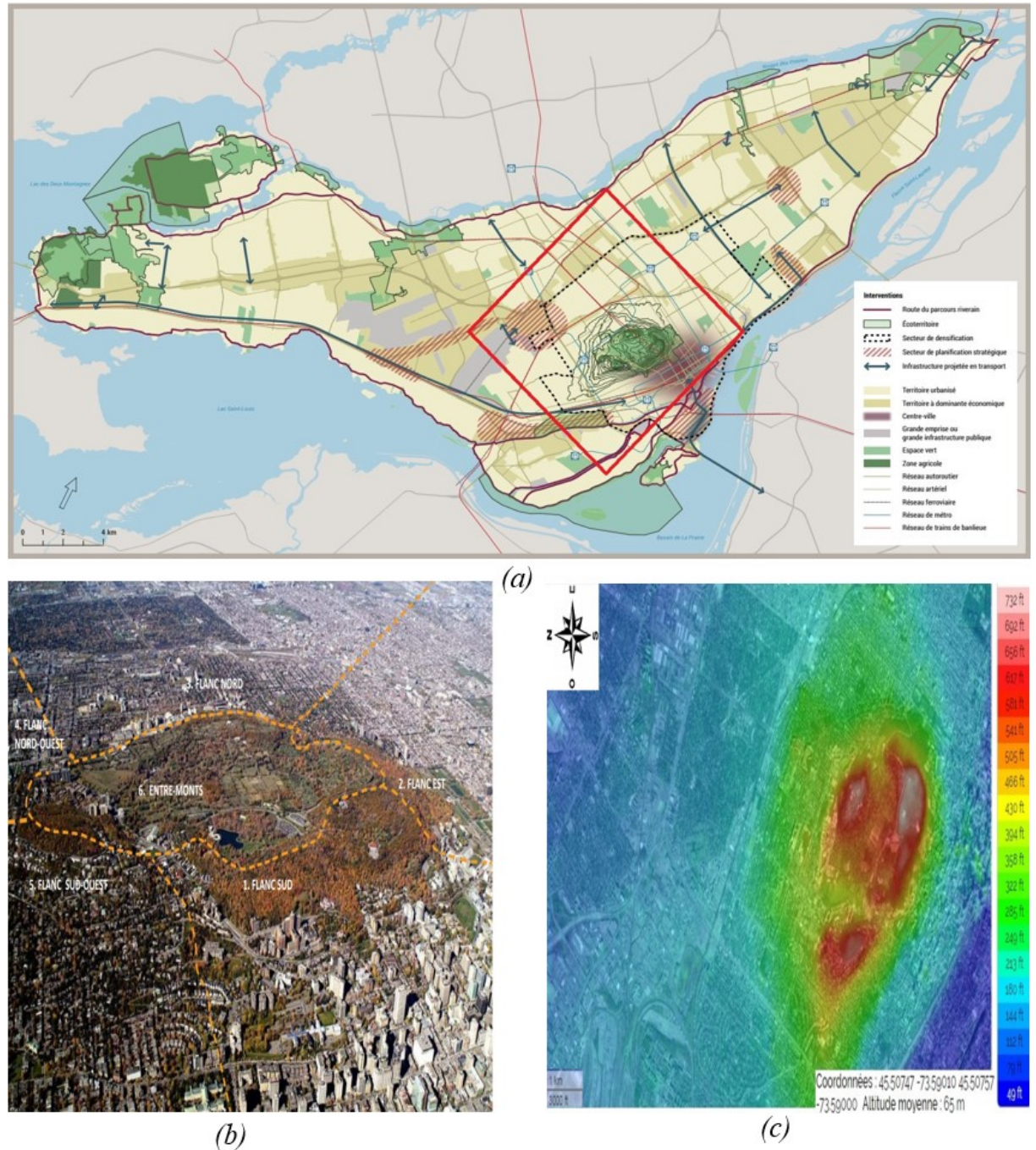


Figure 3.1 : (a) Organisation spatiale de l'agglomération de Montréal [2] (le site d'étude est limité par le cadre rouge), (b) La région de Mont-Royal et les sites environnants de l'agglomération de Montréal [3], (c) Un modèle numérique d'altitudes (en pieds) superposé sur une image aérienne de la zone d'étude

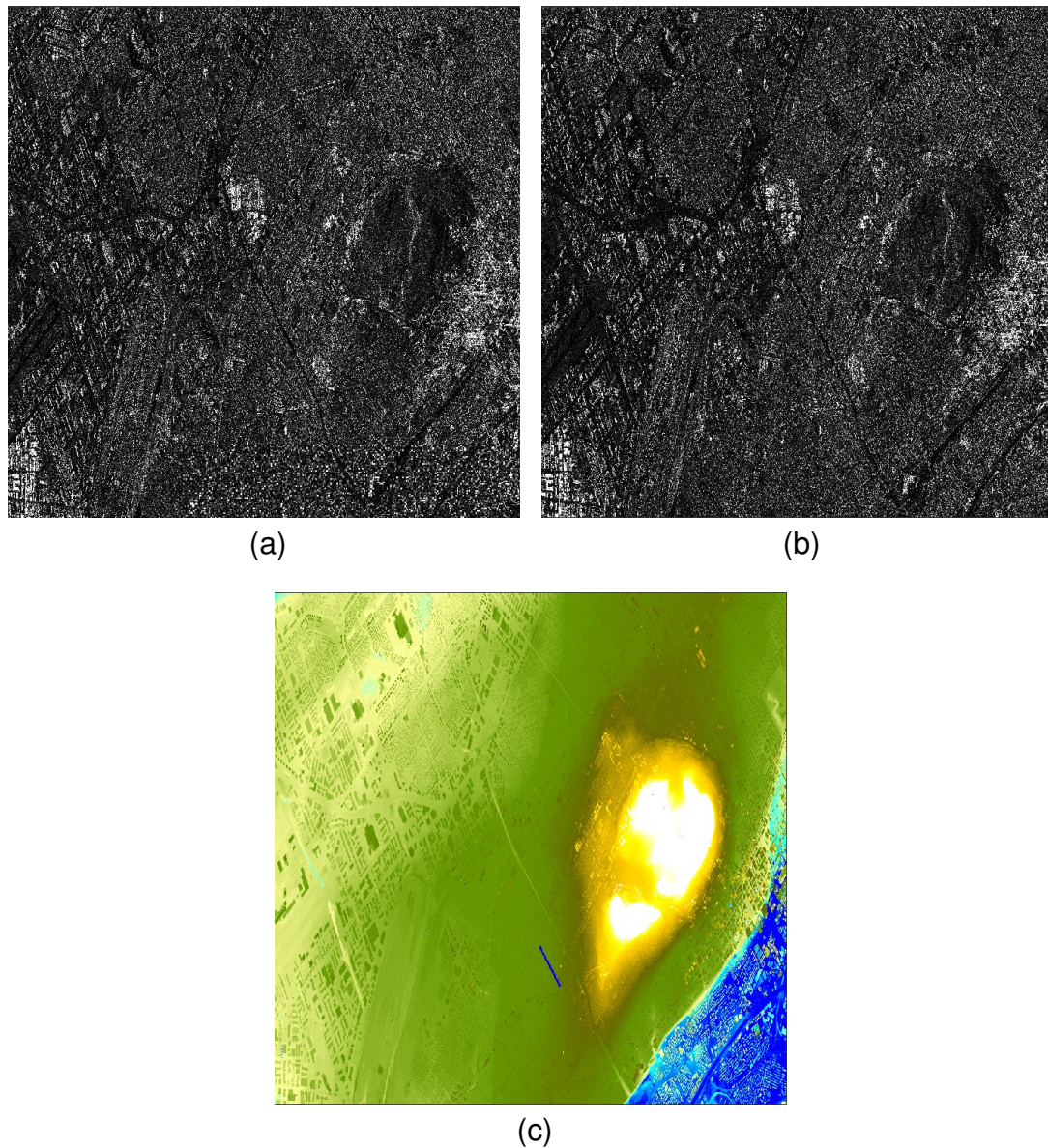


Figure 3.2 : La paire d'images RADARSAT-2 (polarization HH ; mode ultra-fin) couvrant la zone d'étude acquises respectivement le 5 juin 2018 (a) et le 29 juin 2018 (b); (c) MNS Lidar de la zone d'étude

paire d'images en mode ultrafin (figure 3.2) pour les raisons suivantes : a) leur résolution fine de 3,5 m; b) leur polarisation parallèle HH qui présente un bon rapport signal-bruit; c) leur acquisition selon le même segment d'orbite; d) leur ligne de base de 300 m qui permettait d'obtenir la meilleure hauteur d'ambiguïté parmi les paires d'images

disponibles, d'environ 23 m et d) leur acquisition dans un court intervalle de 25 jours : le 5 et 28 juin (2018). Le seul désavantage de cette paire est leur angle d'incidence profond de 23° . Comme mentionné au chapitre 2, un tel angle est à la limite de l'acceptable, particulièrement en milieu urbain, à cause des inversions de pente et des hauts bâtiments qui nuisent à la continuité des phases dans l'interférogramme.

Pour valider les résultats de ce projet, un modèle numérique de surface (MNS) Lidar (Figure 3.2 (c)) de la même région est utilisé. Le MNS reproduit la forme de la surface en incluant tous les éléments surélevés et visibles du paysage comme les bâtiments. Le MNS acquis en 2018 a été téléchargé à partir du site web de la ville de Montréal. Sa résolution est de 1 mètre. Il a été reprojété et rééchantillonné dans la même grille d'images RADARSAT-2.

3.1.3 Approche méthodologique

La figure (3.3) montre sous forme de digramme les étapes pour la création du MNA de la zone d'étude à l'aide de la paire d'images RADARSAT-2. Le logiciel SNAP de l'ESA (Agence Spatiale Européenne) a été utilisé à cette fin. Les étapes de filtrage et de déroulements de phase sont effectuées selon deux approches à des fins de comparaison. Pour la première on fait appel aux algorithmes proposés par SNAP, à savoir, l'algorithme de filtrage de Goldstein [4] et l'algorithme SNAPHU [1] pour le déroulement de phase. La deuxième approche consiste à utiliser les algorithmes développés dans cette recherche de filtrage et de déroulement de phase qui ont été implantés sous forme d'un module SNAP en utilisant un plugin JAVA. Enfin la phase absolue est convertie en hauteur à l'aide de l'opérateur approprié de SNAP. Les détails techniques sur les différentes étapes d'InSAR sont présentés au chapitre 2. Les algorithmes de filtrage et de déroulement de phase développés dans cette recherche sont présentés aux chapitres 4 et 5. Les résultats de ces algorithmes sont comparés à ceux des algorithmes standards de SNAP d'une part et aux données du MNS Lidar d'autre part. Le chapitre 6 contient une description détaillée de ces résultats de validation.

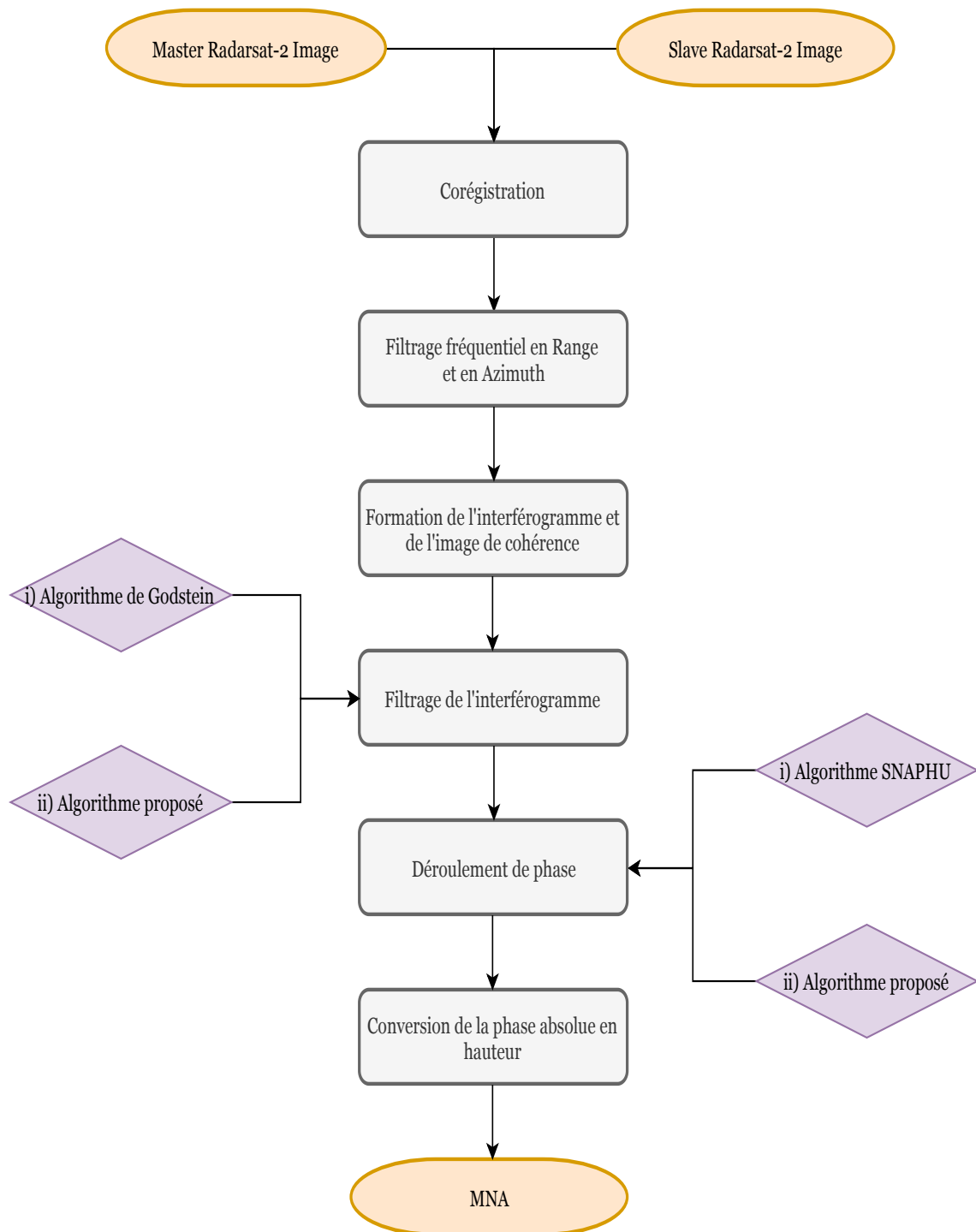


Figure 3.3 : Étapes de traitement InSAR des images RADARSAT-2 pour la création d'un MNA de la zone d'étude

3.2 Production d'une carte de déformations du terrain : Cas de la zone métropolitaine de la vallée de Mexico (ZMVM)

3.2.1 Site d'étude

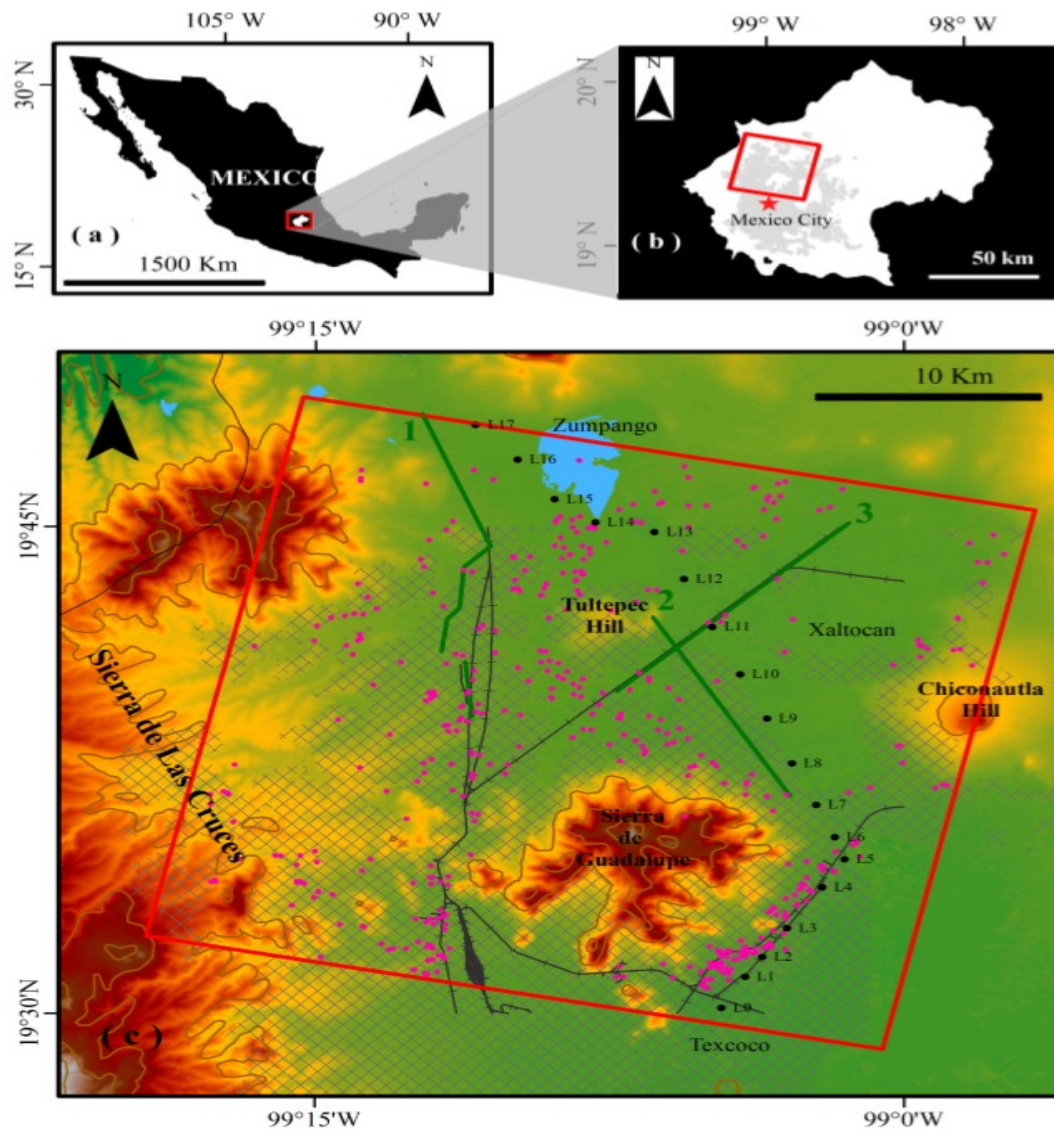


Figure 3.4 : (a) Localisation du bassin du Mexique (b) Zone d'analyse (carré rouge) dans le bassin du Mexique. La ZMVM est colorée en gris et la capitale Mexico est indiquée par l'étoile rouge, (c) Physiographie de la zone d'étude [8], les principales caractéristiques de la zone d'étude sont représentées : Chaîne montagneuse, collines et anciens lacs (Texcoco, Xaltocan et Zumpango).

Le bassin de la vallée du Mexique (Figure 3.4) étant à l'origine le site de plusieurs lacs et marais repose en grande partie sur des sédiments lacustres d'une épaisseur allant jusqu'à 100 m, sous lesquels se trouvent des sédiments alluviaux d'une épaisseur pouvant atteindre 500 m. Sous les sédiments alluviaux se trouvent 100 à 600 m de dépôts volcaniques qui forment le principal aquifère de la ville de Mexico (environ 500 à 1000 mètres sous la ville de Mexico) [6]. Avec la croissance démographique de Mexico et l'augmentation de la demande en eau, cet aquifère principal est surexploité, ce qui a entraîné une baisse du niveau de la nappe phréatique souterraine, accompagnée d'un affaissement du sol. Ceci a eu de graves conséquences pour la Cité de Mexico qui enregistre actuellement l'un des taux de subsidence les plus élevés jamais mesurés. Ces taux atteignent jusqu'à 40 cm/an [6] dans certaines zones de la ville.

Dans cette étude nous nous intéressons à la zone métropolitaine de la vallée de Mexico (ZNVM). Elle couvre une superficie d'environ 4715 km² et elle est située dans la partie ouest du bassin du Mexique à une altitude moyenne de 2240 m au-dessus du niveau de la mer. Elle est entourée de plusieurs chaînes montagneuses et volcans qui atteignent jusqu'à 5500 m au-dessus du niveau de la mer. Sa population atteignait presque 21 millions habitants en 2015. Notre site à l'étude se trouve dans la partie nord de la ZMVM entre les longitudes 98°57'W, 99°18'W et les latitudes 19°49'N et 19°29'N. Ce site est indiqué par le rectangle rouge dans la figure 3.4.

3.2.2 Données utilisées

Les données RSO du satellite Sentinel-1 ont été utilisées pour cette application. La mission Sentinel-1 est une initiative du Copernic de l'ESA [7]. Elle se compose de deux satellites Sentinel-1A et Sentinel-1B lancés respectivement en avril 2014 et en avril 2016. Ils portent des RSO en bande C et partagent la même orbite quasi polaire. Le cycle de répétition de cette constellation est de 6 jours et 12 jours pour chaque satellite. Les produits des données Sentinel-1 sont distribués en différents modes : "StripMap SM", "Interferometric IW", "Extra Wide Swath EW", polarisations (simple, double) et résolutions : "full", "high", "moyen". Dans cette étude, nous avons choisi deux produits

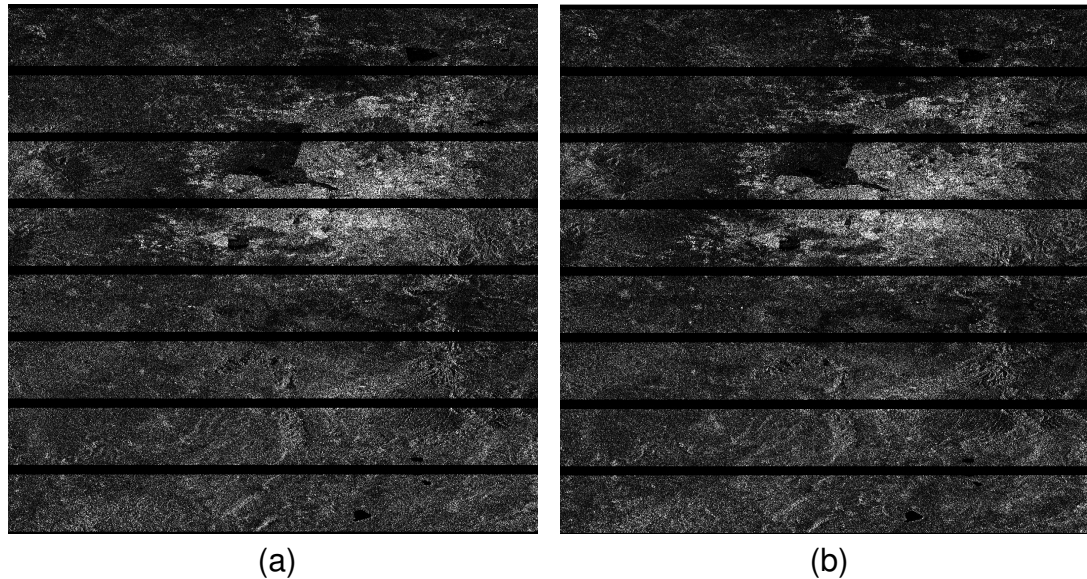


Figure 3.5 : Images Sentinel-1 acquises respectivement a) le 8 novembre 2014 ; b) le 2 décembre 2014

Sentinel-1 TOPSAR IW (SLC) couvrant le site à l'étude et acquis respectivement le 8 novembre et le 2 décembre 2014 en polarisation parallèle HH (Figure 3.5). Cette paire a été choisie : a) pour sa petite ligne de base de 10,25 mètres qui réduit passablement les impacts de la topographie sur les phases et b) pour l'angle d'incidence de 44° qui, compte tenu du relief topographique de la zone, diminue les erreurs de discontinuité de phase.

Des résultats des études antérieures sur la déformation de surface par DInSAR obtenus en utilisant différents capteurs RSO (ENVISAT [6], ERS [8], RADARSAT-2 [5], Sentinel-1 [9]) ont été utilisés pour tester le potentiel des algorithmes développés pour la cartographie des déformations du terrain.

3.2.3 Approche méthodologique

Chaque produit Sentinel-1 TOPSAR IW, consiste en une série d'images par bande et par polarisation. Les produits IW ont trois bandes. Chaque bande se compose d'une série de sous-bandes "burst", où chaque "burst" est traitée comme une image SLC séparée. La

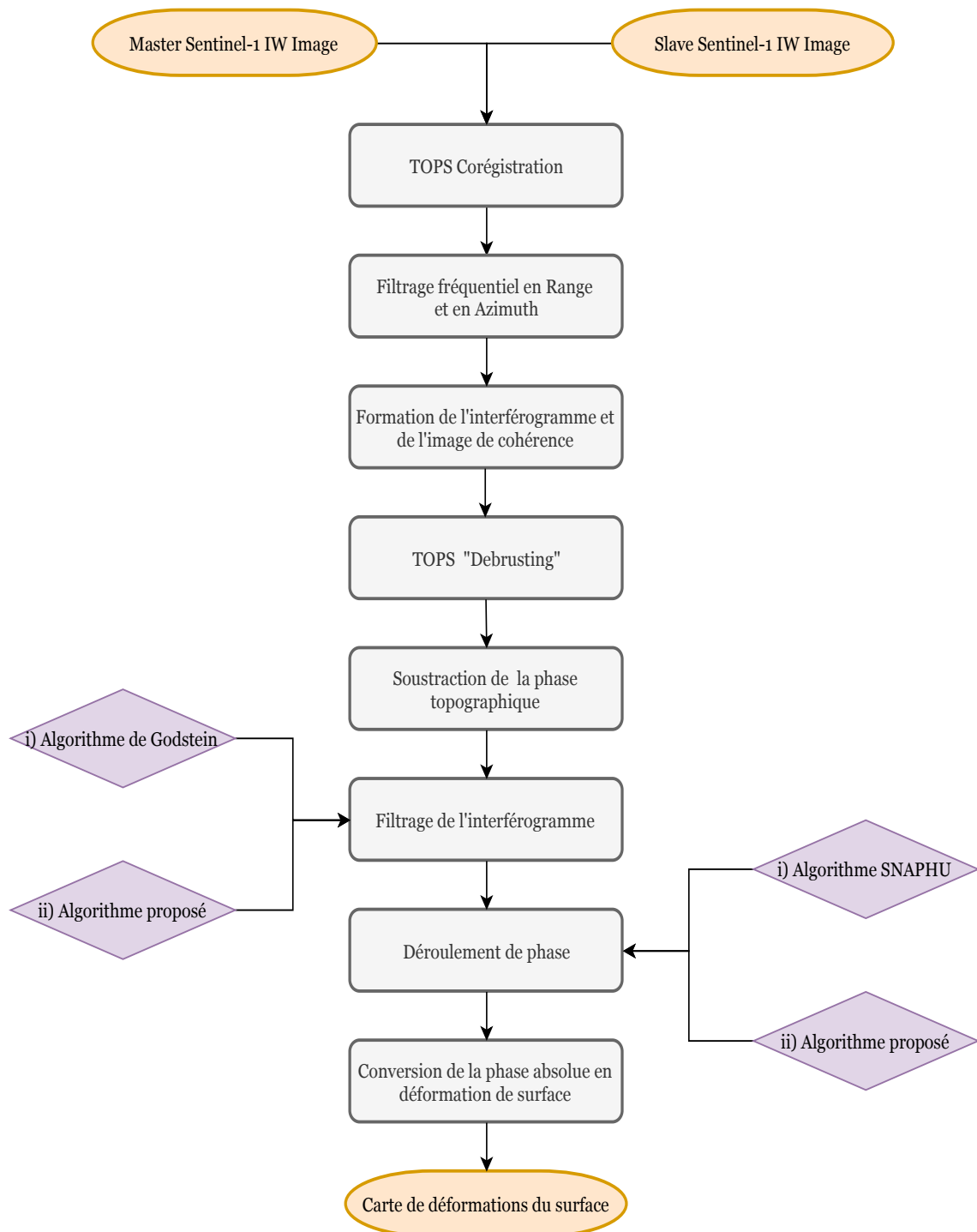


Figure 3.6 : Étapes de traitement DInSAR des images Sentinel-1 pour la création d'une carte de déformation de surface de la zone d'étude

figure (3.6) montre sous forme de diagramme les étapes du traitement DInSAR appliquée sur les images Sentinel-1 en exploitant le logiciel SNAP de l'ESA. Un modèle numérique d'altitudes externe (SRTM de 30 m de résolution) ainsi que des informations précises sur l'orbite fournies par l'ESA sont utilisés pour effectuer la procédure de recalage. Ces étapes du traitement interférométriques sont effectuées sur les sous-bandes. De ce fait, après l'étape de la formation de l'interférogramme, il est nécessaire de rassembler toutes les sous-bandes de l'interférogramme en une seule image. Cette étape est réalisée par l'opérateur "S-1 TOPS Deburst" du SNAP. À ce niveau l'opérateur d'élimination de la phase topographique de SNAP est appliqué sur l'interférogramme en utilisant le même MNA utilisé précédemment à l'étape de recalage. Avant de passer à l'étape de déroulement de phase, l'interférogramme est filtré afin d'améliorer le rapport signal/bruit (SNR). Enfin la phase absolue est convertie en une carte de déformation de surface en utilisant l'opérateur approprié de SNAP. Les étapes de filtrage et de déroulement de phase sont réalisées, en premier lieu, respectivement par les algorithmes standards de Goldstein [4] et SNAPHU [1]. Il est à noter que ces algorithmes ont été déjà utilisés dans d'autres études sur la déformation du sol au Mexique et des résultats fiables ont été obtenus [6, 8, 9]. En second lieu, les algorithmes de filtrage et de déroulement de phase développés dans cette recherche sont appliqués sur le même interférogramme. Ce qui permet de comparer les résultats des algorithmes proposés d'une part à ceux des algorithmes standards appliqués avec les mêmes images et d'autre part à ceux des études antérieures sur la même région [5, 6, 8, 9]. Le chapitre 6 présente cette application avec plus de détails.

Bibliographie

- [1] Curtis W Chen et Howard A Zebker. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping : intractability and two new algorithms : erratum. *JOSA A*, 18(5):1192–1192, 2001.
- [2] Ville de Montréal. Schéma d'aménagement et de développement de

- l'agglomération de Montréal. Téléchargeable à https://www.dropbox.com/s/d88pmdg4wjshxh3/Schema_38_DocumentIntegral.pdf, 2015.
- [3] Atlas du paysage du mont Royal. Caractérisation du paysage à l'échelle de la montagne, 2012.
- [4] Richard M Goldstein, Howard A Zebker et Charles L Werner. Satellite radar interferometry : Two-dimensional phase unwrapping. *Radio science*, 23(4):713–720, 1988.
- [5] Riccardo Lanari, Paolo Berardino, Manuela Bonano, Francesco Casu, Claudio De Luca, Stefano Elefante, Adele Fusco, Michele Manunta, Mariarosaria Manzo, Chandrakanta Ojha et al. Sentinel-1 results : Sbas-dinsar processing chain developments and land subsidence analysis. Dans *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pages 2836–2839. IEEE, 2015.
- [6] Penélope López-Quiroz, Marie-Pierre Doin, Florence Tupin, Pierre Briole et Jean-Marie Nicolas. Time series analysis of mexico city subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1):1–15, 2009.
- [7] Randy Showstack. Sentinel satellites initiate new era in earth observation. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 95(26):239–240, 2014.
- [8] Gabriela Siles, Juan Alcérreca-Huerta, Penélope López-Quiroz et Wolfgang Niemeier. Long term subsidence analysis and soil fracturing zonation based on insar time series modelling in northern zona metropolitana del valle de mexico. *Remote Sensing*, 7(6):6908–6931, 2015.
- [9] Andrew Sowter, Moh Bin Che Amat, Francesca Cigna, Stuart Marsh, Ahmed Athab et Lubna Alshammari. Mexico city land subsidence in 2014–2015 with sentinel-1 iw tops : Results using the intermittent sbas (isbas) technique. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 52:230–242, 2016.

CHAPITRE 4

UNE NOUVELLE FORMULATION DU FILTRE GAUSSIEN ANISTROPIQUE ADAPTATIF POUR LE FILTRAGE D'INTERFÉROGRAMME

Résumé

L'interférométrie SAR (InSAR) peut nous fournir des informations sur la morphologie des environnements urbanisés et leur structure en trois dimensions. La création de modèles numériques de surface (MNS) présente des difficultés en raison du bruit interférométrique. Filtrer la phase avant l'étape du déroulement des phases est une opération essentielle pour réduire l'impact des erreurs sur cette procédure. Cependant, l'utilisation d'un filtre de lissage peut éliminer les informations locales dans un interférogramme. Un filtre de phase idéal devrait être capable de réduire le bruit de phase tout en préservant les détails fins de la texture dans un interférogramme. Dans cet article, un tel filtre interférométrique est proposé. Ce filtre est une nouvelle formulation du filtre gaussien anisotrope adaptatif dans le domaine spatial basé sur la distribution statistique du bruit de phase et les statistiques locales de l'interférogramme. Des tests avec des images SAR simulées et réelles montrent que le filtre proposé montre un plus grand potentiel d'adaptation aux caractéristiques des interférogrammes en milieu urbain que des filtres standards.

A NEW FORMULATION OF THE ANISOTROPIC ADAPTIVE GAUSSIAN FILTER FOR INTERFEROGRAM DENOISING

Ayoub Tlili^{1,2}, François Cavayas¹, Samuel Foucher²

¹Université de Montréal, Montréal, Canada

²Computer Research Institute of Montreal (CRIM),
Montréal, Canada

October 8, 2020

Abstract

Interferometric SAR (InSAR) can provide us with information on the morphology of urbanized environments and their 3-D structure. The generation of digital surface models (DSM) may be, however, problematic due to the interferometric noise. Filtering the interferogram before unwrapping is thus critical to reduce the impact of noise on this procedure. An ideal phase filter should be able to reduce phase noise while preserving the variations of the phase gradient. Such a filter is proposed in this article. It is a new formulation of the Adaptive Anisotropic Gaussian filter in the spatial domain based on the statistical distribution of the phase noise and local statistics in the interferogram. Applied to both simulated and real interferograms the proposed filter gave better results than standard filters such as the Goldstein filter or the adaptative Lee filter.

InSAR, Filtering, Interferogram, DSM, Coherence, Gaussian Kernel, Urban Areas

4.1 Introduction

Application of satellite SAR repeat-pass interferometry to create DSM in urban areas of high-altitude resolution, requires SAR images of metric spatial resolution. In such images phase jumps and discontinuities due to layover and shadows created by buildings and/or surface topography are clearly apparent [13]. These problems, as well as interferometric noise caused by various phase decorrelation sources, complicate the phase unwrapping operation. Filtering the interferogram before unwrapping is thus critical to reduce the impact of noise on this procedure.

Since the last thirty years an important volume of publications on this subject had been generated. Xu and al. [13] present a thorough review accompanied with tests comparing the results of various filters. They distinguish three principal filter categories : a) local filters ; b) transformed domain filters and c) nonlocal filters (NL). Most of the available software dedicated to InSAR processing implements filtering techniques mostly among the first two categories. The adaptive Lee filter [6] and its variants in the local category as well as the filter of Goldstein and Werner [9] and its variants in the transfor-

med domain are usually implemented. The nonlocal filters as the NL-InSAR technology [3] are recently introduced and are somewhat in an experimental stage. Considering their experimental results, Xu et al. [13] argue that the Lee filter reduces the noise while preserving details except in areas of very low coherence where it introduces many artifacts. Concerning the Goldstein filter, it has a good performance in high-coherence areas. However, there are many residues in low coherence areas and there are indications that it introduces phase distortion in high topography areas.

In the present study we decided to re-examine the concept of local adaptive filters. The basic idea is to filter the interferometric phase according to the local noise level in order to preserve the fringe pattern and fine texture details. Despite the large number of adaptive filters proposed in the literature [13], the majority of them are not designed according to the probability density function (PDF) of interferometric phase noise. This PDF is a circularly symmetric complex Gaussian distribution integrating the coherence and the number of looks [6]. The noise statistics can then be easily calculated and introduced into a smoothing Gaussian convolution operator to filter the interferogram. Wang and al. [11] have proposed an anisotropic Gaussian filter to filter the interferogram. Contrary to classical isotropic filters, this filter can be locally adapted according to the noise level. Two major issues need to be addressed. One is to properly construct the filter kernel and the other is to accurately estimate the orientation of the image structures. D'Hondt and al. [4] have shown that it is possible to estimate the filter kernel and orientation angle for an Anisotropic Gaussian Kernel (AGK) from the texture of SAR images. Wang and al. [10] proposed an Adapted Anisotropic Gaussian (AAG) filter to find feature matches for SAR image registration. Features are detected and described in an AAG scale space. Noise is filtered, but details and edges remain unaffected in this scale space. In this article, the AAG filter is adapted to filter the interferogram based on the probability density function of the phase noise.

Our article is organized as follows. Section 4.2 presents the theoretical framework of the proposed method. Section 4.3 describes the data used in this study. Section 4.4 presents and discuss the results of the proposed filter. Finally, section 4.5 concludes this

article.

4.2 Theoretical framework of the proposed method

4.2.1 Probability distribution function of the interferometric phase noise

The one-look phase probability distribution function (PDF) [8] is :

$$pdf(\phi) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{1 - \gamma^2}{1 - y^2} \times \left\{ 1 + \frac{y}{\sqrt{1 - y^2}} \cos^{-1}(-y) \right\} \quad (4.1)$$

with

$$y = \gamma \times \cos(\phi - \psi) \quad (4.2)$$

Where γ is the interferometric coherence, ψ is the real phase, and ϕ is a random angle : $-\pi \leq \phi \leq \pi$.

The $pdf(\phi)$ is symmetrical about ψ which is the mean with modulus 2π . The standard deviation is independent of ψ . The quality of the interferometric phase depend on the interferometric coherence γ . The higher the coherence the better the quality of the interferometric phase. Fig. 4.1 shows the variation of the $pdf(\phi)$ as a function of the interferometric coherence γ and the phase difference ϕ in an interferogram.

High coherence values mean that the two images are almost identical, including the statistical distribution of the speckle. This is only possible if the ground targets have not changed between the two acquisitions and if the geometric conditions of the images are very close. A weak coherence means a strong decorrelation between the two images. This decorrelation is the result of different interferometric noise effects. The scattering type contributes significantly to this decorrelation, especially when it is a distributed target. This is generally found in areas where there is more volume scattering, such as vegetation covered areas. In urban areas, where building structures and construction material properties favor single or double bounce scattering as well as Bragg scattering the interferometric coherence is generally high (Fig. 4.2). Therefore, in such areas phase filtering should only be performed in areas where interferometric coherence is low.

To reduce phase unwrapping problems introduced by the phase noise, multilook pro-

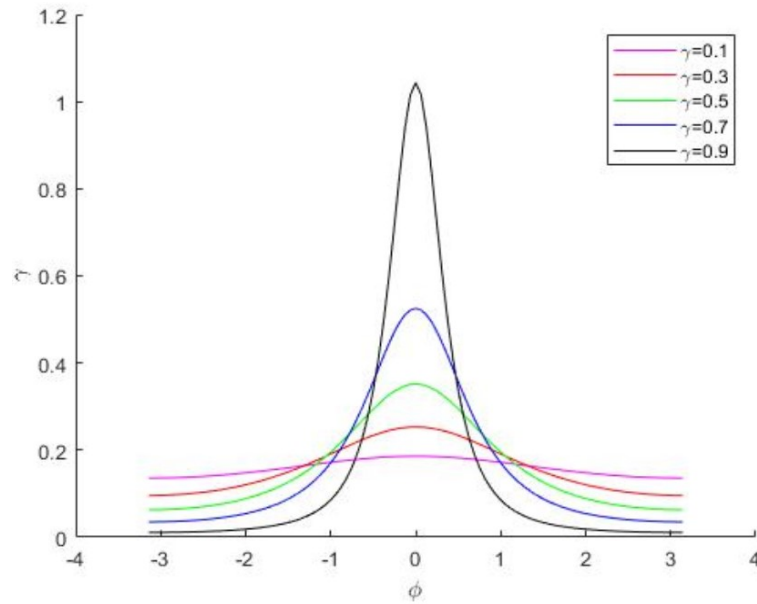


Figure 4.1 : Single look probability density function of the interferometric phase noise according to the interferometric coherence value γ and the phase difference value ϕ

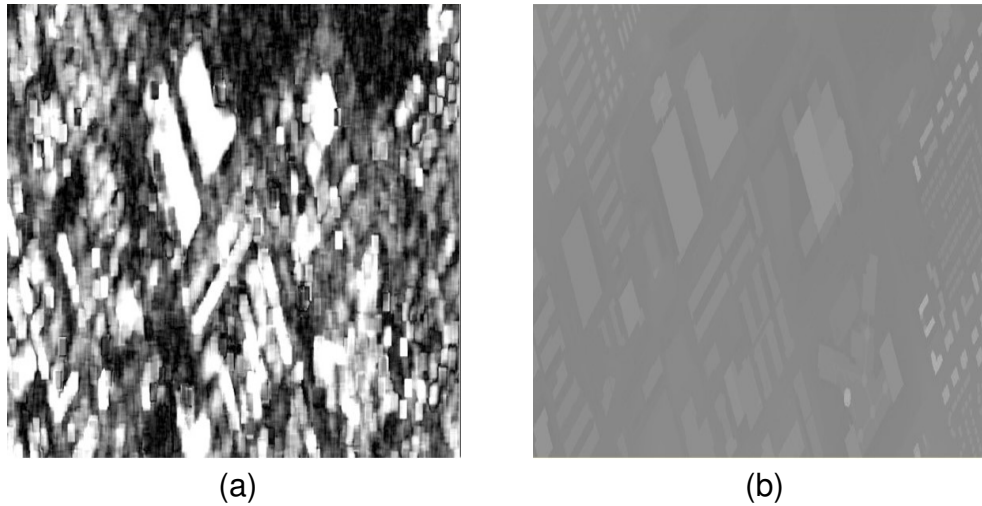


Figure 4.2 : (a) Interferometric coherence from a pair Radarsat-2 images, and (b) Digital surface model (DSM) covering a region of the city of Montreal

cessing is frequently implemented by averaging neighboring pixels. Considering this case, [6] derived the following multilook probability distribution function pdf_{NL} :

$$pdf_{NL}(\phi) = \frac{\Gamma(NL+1/2)(1-\gamma^2)^{NL}y}{2\sqrt{\pi}\Gamma(NL)(1-y^2)^{NL+1/2}} + \frac{(1-\gamma^2)^{NL}}{2\pi} \times F(1, NL; 1/2; y^2) \quad (4.3)$$

Where NL is the look number, Γ is a Gamma function, and F is a Gaussian hypergeometric function. Figure 4.3 shows the variation of the $pdf_{NL}(\phi)$ as a function of the look number for a given coherence value $\gamma = 0.5$.

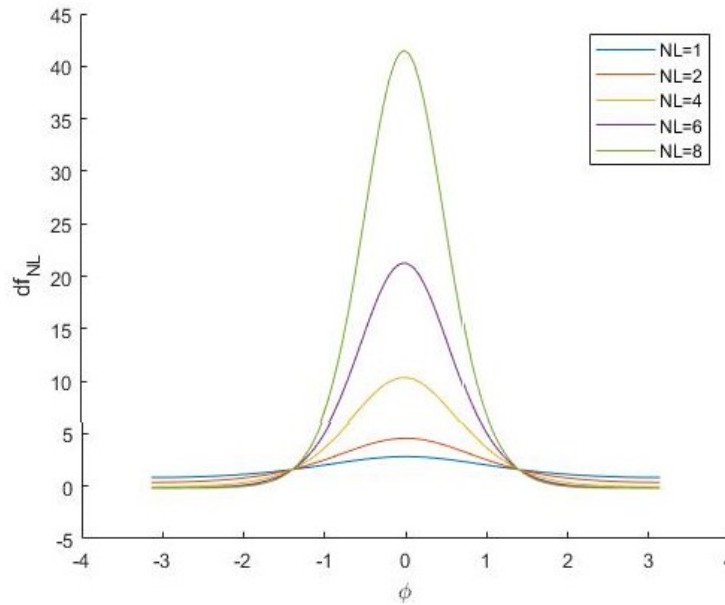


Figure 4.3 : Multibook probability density function for the phase as a function of the number of looks (NL) for a constant coherence value $\gamma = 0.5$

As shown in the two Figures (Fig 4.2 and 4.3), the PDF of the phase noise depends on the coherence γ and the number of look NL . Based on Eq. 4.3, the variation of noise is plotted in Figure 4.4 as a function of the NL and γ .

4.2.2 Proposed filter

The oriented Anisotropic Gaussian Filter (AGF) (Fig. 4.5) is defined as :

$$F_{\theta}(x_{\theta}, y_{\theta}, \sigma_x, \sigma_y, \theta) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\frac{x_{\theta}^2}{2\sigma_x^2}\right\} * \exp\left\{-\frac{y_{\theta}^2}{2\sigma_y^2}\right\} \quad (4.4)$$

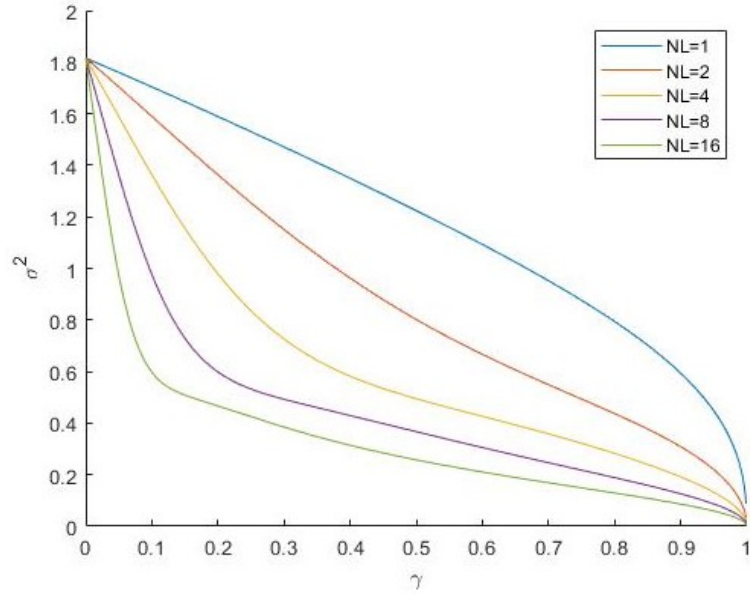


Figure 4.4 : Phase noise variance σ_ϕ^2 as a function of interferometric coherence γ and looks number NL

Where '*' represents the convolution operator. The 2-D convolution can be obtained by convolving first with a 1-D Gaussian in the x_θ -direction, then with another 1-D Gaussian in the y_θ -direction. θ is the Gaussian orientation angle, where x_θ -axis is directed in θ direction, whereas y_θ -axis is orthogonal to θ , and

$$\begin{bmatrix} x_\theta \\ y_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

The orientation angle θ is calculated in the same way in [10]. They calculated the gradient orientations of the neighbors of the sample point to form an orientation histogram. The mode of the histogram is considered as the direction of the gradient. The θ is determined as orthogonal to the direction of the gradient.

The standard deviations of Eq. 4.3 σ_x and σ_y represent the scaling parameters in respectively the x_θ and y_θ axis. The level of filtering must be in accordance with the phase noise level, therefore we choose

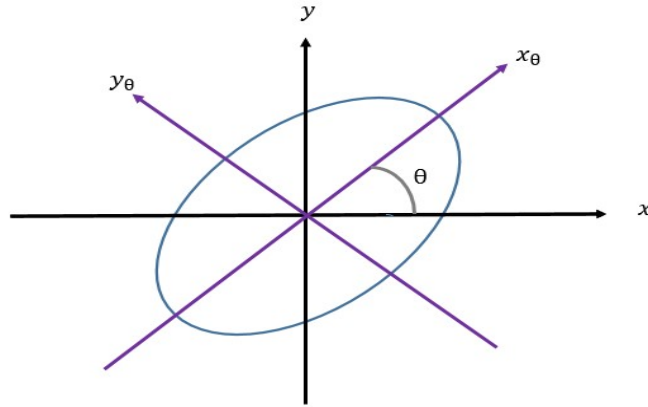


Figure 4.5 : Anisotropic Gaussian Filter (AGF)

$$\sigma_x = \sigma_\phi^2 \quad (4.6)$$

σ_ϕ is given by the relationship established previously in Figure 4.4. While, σ_y values depend on the noise level and the local image structure and can be computed as follows :

$$\sigma_y = \sigma_\phi \beta^n \quad (4.7)$$

β^n is calculated to provide the local statistical characteristics. According to [10], $n = 1/3$ and β is defined as :

$$\beta = \frac{\lambda_m}{\lambda_M} \quad (4.8)$$

λ_m and λ_M are the minimum and maximum eigenvalues of the second moment matrix M_s at each pixel. According to [10] M_s is defined as :

$$M_s = \begin{bmatrix} I_x^2(x,y) & I_x I_y(x,y) \\ I_x I_y(x,y) & I_y^2(x,y) \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Where I_x and I_y are the derivatives at the sample point (x,y) respectively in the x and y direction. Prewitt operator is used respectively in x and y direction to find the derivatives I_x and I_y .

The same filter is applied on both the real ($\cos \phi$) and imaginary ($\sin \phi$) parts of the complex InSAR phase. And then the final filtered phase is composed by the two parts. The smoothing strength of the AAG filter depends on the standard deviation σ^2 of the pdf of the phase noise. In practice, a larger σ^2 value will require a larger convolution kernel in order to be accurately represented. The idea is therefore to use an adaptive window w according to the value of σ^2 . The higher the σ^2 value, the larger the window size. The relationship between them will be :

$$w = 2 \times \lceil 3 \times \sigma_\phi^2 \rceil + 1 \quad (4.10)$$

4.3 Datasets

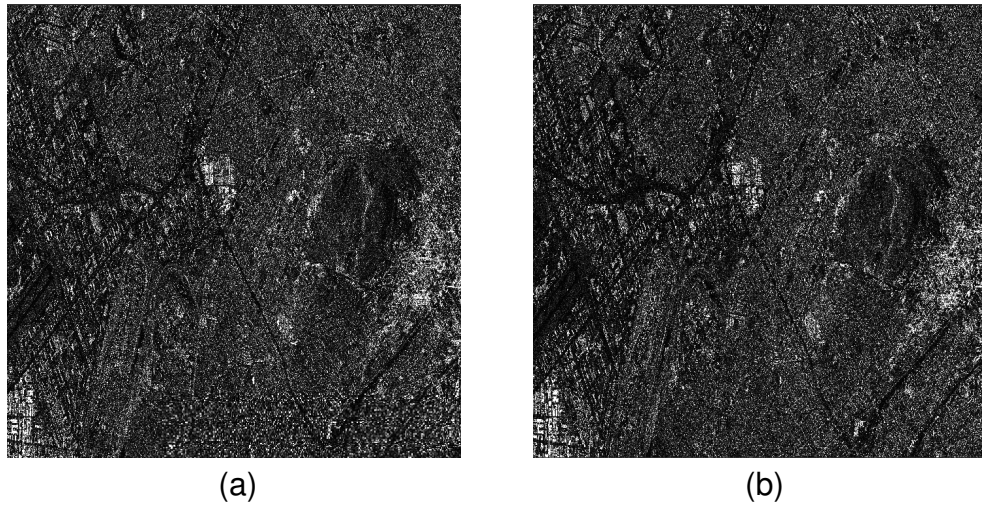


Figure 4.6 : Radarsat-2 intensity images (HH polarization ; ultra-fin mode)

An interferometric processing is applied to a pair of RADARSAT-2 images (HH polarization ; ultra-fine mode ; Incidence angle of 23°) taken respectively on June 5, 2018 (Fig. 4.6(a)) and June 29, 2018 (Fig. 4.6(b)), covering a region of the Montreal Island (Quebec, Canada). The processing consists of three steps : (a) registration of the two SAR images, (b) formation of the interferogram and the coherence image and (c) filtering of the interferogram. These steps were carried out using the SNAP software of the ESA

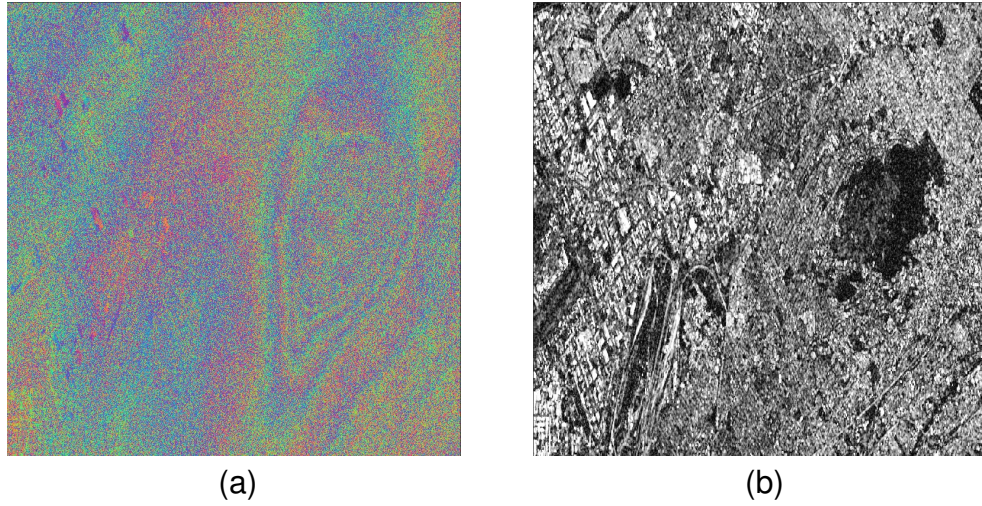


Figure 4.7 : Real interferogram created from an interferometric processing ; (a) Interferogram ; (b) Interferometric coherence

(European Space Agency). Fig. 4.7 shows the results of this interferometric processing (InSAR).

To closely simulate the characteristics of a SAR image, the SAR simulation technique proposed by [7] is used. This technique considers the motion of the SAR sensor, the geometric distortions due to the earth curvature and the topographic effects (layover, foreshortening, and radar shadows). The simulation algorithm maps each cell of a given DSM (Fig. 4.8(a)) to an image pixel in the Azimuth/Slant range image domain. From this image we generate a local incidence angle φ and the backscattered power (brightness value) for each pixel according to Muhleman backscatter model [5].

Using the slant range R_s and the local incidence angle φ generated by the simulation algorithm, the interferometric phase difference $\Delta\phi$ (Fig. 4.8(b)) is calculated as follow :

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{b_n}{R_s \sin(\varphi)} \times h \quad (4.11)$$

Where λ is the radar wavelength, b_n is the perpendicular baseline, and h is the DSM altitude.

To generate a simulated noisy interferogram the PDF of the phase noise (Eq. 4.3) is used (Fig. 4.8(c)). The coherence value γ is taken from the real coherence image (Fig. 4.7(b)).

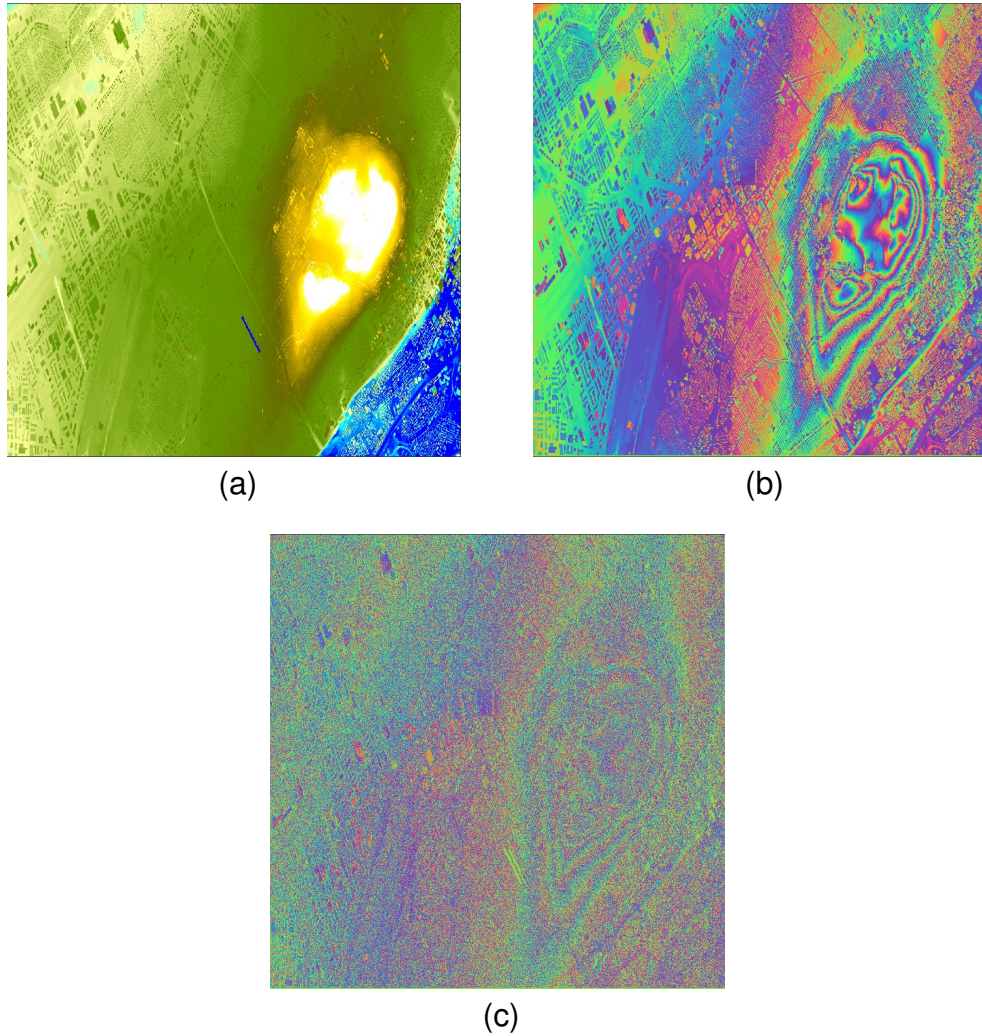


Figure 4.8 : Simulated (b) and noised (c) interferogram based on DSM (a) covering a region of the city of Montreal

4.4 Results and discussions

The filtering performance of the proposed filter is tested on both simulated and real data. The results of this filter are compared to those of Goldstein [9], Baran [1], Lee

InSAR [6], Refined Lee [2] and Boxcar filter.

To evaluate the quality of the denoising methods, different image quality measurements are used. First, the root mean square error (RMSE) is calculated to measure the mean square difference between the filtered interferogram and the simulated interferogram without noise. Secondly, the residue number is calculated to assess the filtering performance of the different filters. The residue number is defined as the total number of negative and positive residues [9]. Finally, the Structural Similarity Index (SSIM) [12] is calculated locally to evaluate the performance of the filtering to maintain the local variation of the phase gradient. SSIM combines local image structure, luminance and contrast into a single local quality score. The SSIM value is between -1 and 1, a high SSIM means a great similarity between the two compared images.

4.4.1 Simulated InSAR data

Figure 4.9 shows the interferograms results of the different filters. Where (a), (b), (c), (d), (e), (f) are respectively the Goldstein, Baran, InSAR-Lee, Refined-Lee, Boxcar, and the proposed anisotropic Gaussian (PAGF) filters. Visually, we can see the ability of the proposed filter to preserve the fringes continuity and the overall structure of the interferogram. Table 4.I presents the RMSE between a filtered interferogram and the simulated interferogram without noise (Fig. 4.8(b)), and the number of residues in the filtered interferogram. The proposed filter showed a good performance in RMSE and residues reduction comparatively to other filters. It can reduce the number of residues to 85%. Also, the InSAR-Lee and the Boxcar filters showed a good performance on the reduction of the residues number 70%, but a higher RMSE compared to Baran and Refined-Lee filters. This can be explained by the fact that the Boxcar and InSAR-Lee filters tend to over-smooth the interferogram without preserving local phase details. To compare the ability of filters to preserve the phase gradient and especially building boundaries, the SSIM is calculated between the simulated interferogram without noise (Fig. 4.8(b)) and the filtered interferograms over a small urban area in the city of Montreal (Table 4.II). Fig. 4.10 shows the filtered interferograms and Fig. 4.11 shows the SSIM

map quality over the image. According to the Table 4.II and Fig. 4.11, the performance of the PAGF is relatively good at maintaining local phase variations and building boundaries compared to other filters. The Boxcar, Goldstein and InSAR-Lee filters showed a low SSIM value. The Refined-Lee and Baran filters improved the SSIMs of Lee's and Goldstein's filters respectively. They have more ability to preserve the variation of the phase gradient, but they result in a higher number of residues than a simpler filters like the Boxcar one. According to Table 4.I, the proposed filter further reduces the number of residues without altering the information on local phase variations. The PAGF and Baran filters have the better SSIM values. This confirms the potential of interferometric coherence to guide phase filtering in order to better preserve local phase variations in the interferogram. The proposed method has the advantage over the Baran method of considering statistics of local phase texture.

Tableau 4.I : Simulated interferogram filtering results

Filter	NSI Fig.8(c)	Gol- dstein	Baran	InSAR- Lee	Refined- Lee	Boxcar	PAGF
RMSE	2.32	2.27	2.16	2.19	2.15	2.2	1.99
Residus $\times 10^5$	32	27	19	9.6	19	9.6	4.8

Tableau 4.II : SSIM results for a simulated interferogram

Filter	NSI Fig.8(c)	Gol- dstein	Baran	InSAR- Lee	Refined- Lee	»Boxcar	PAGF
SSIM	0.04	0.065	0.11	0.07	0.09	0.063	0.16
Residus $\times 10^5$	1.1	0.9	0.5	0.3	0.5	0.3	0.14

4.4.2 Real InSAR data

In the same way as for the simulated interferogram, the real one is filtered by the same filters. The RMSE and the number of residues are used to compare the results of these filters in the entire interferogram (Fig. 4.12 and Table 4.III). The SSIM is applied

in urban area to compare the performance of different filters to preserve local details and object boundaries (Fig. 4.13, Fig. 4.14 and Table 4.IV). The SSIM and the RMSE are used to compare the results of those filters to the simulated interferogram without noise (Fig. 4.8(b)). According to Fig. 4.12, the proposed filter performs better than the other filters in areas where coherency is low. The Baran and the proposed filter showed the best RMSE. Baran has the advantage in the number of residues, but this filter seems to smoother the interferogram and therefore lose local details (Fig. 4.13(d) and Table 4.IV). On the urban area (Fig. 4.13(b)), the PAGF, Boxcar, and InSAR Lee filters gives the better SSIM (Table 4.IV). Unlike the refined Lee and Baran filters, the proposed filter keeps his performance on real and simulated interferograms. The proposed filter significantly reduces the number of residues while preserving phase local details.

Tableau 4.III : Real interferogram filtering results

Filter	NSI Fig.8(c)	Gol- dstein	Baran	InSAR- Lee	Refined- Lee	»Boxcar	PAGF
RMSE	2.57	2.54	2.53	2.55	2.5	2.55	2.53
Residus $\times 10^5$	26	10	3.7	7.1	17	6.8	6.5

Tableau 4.IV : SSIM results for the real interferogram

Filter	NSI Fig.8(c)	Gol- dstein	Baran	InSAR- Lee	Refined- Lee	»Boxcar	PAGF
SSIM	0.006	0.008	0.009	0.016	0.012	0.016	0.016
Residus $\times 10^5$	1	0.35	0.15	0.27	0.6	0.26	0.2

4.5 Conclusion

In this article, a new interferometric phase filter is proposed. This filter is a new formulation of the adaptive anisotropic Gaussian filter in the spatial domain based on the statistical distribution of phase noise and local statistics in an interferogram. Real and simulated interferograms are used to compare the results of this filter with other

standard filters. Three image quality measurements are used. The mean square error and the number of residues are used to compare the overall behaviour of the different filters while the structural similarity index is used to locally evaluate the performance of those filters. The proposed filter shows the best results, it can reduce the interferometric noise while preserving phase gradient variations.

Acknowledgment

This project was financed by Canadian Space Agency (SOAR program), NSERC and the Ministère de l'Économie et de l'Innovation (MEI) of the province of Québec.

Bibliographie

- [1] Stewart-M.P. Kamps B.M. Perski Z. Baran, I. et P. Lilly. A modification to the goldstein radar interferogram filter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(9):2114–2118, 09 2003.
- [2] Chen-K.S. Chao, C.F. et J.S. Lee. Refined filtering of interferometric phase from insar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(12):5315–5323, 12 2013.
- [3] Denis-L. Deledalle, C.A. et F. Tupin. NI-insar : Nonlocal interferogram estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(4):1441–1452, 04 2011.
- [4] Ferro-Famil L. D'Hondt, O. et E. Pottier. Local orientation analysis of spatial texture from polarimetric sar data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages 1236–1239, 09 2004.
- [5] Franz W Leberl. Radargrammetric image processing. Rapport technique, Artech House, 1990.

- [6] Papathanassiou-K.P. Ainsworth T.L. Grunes M.R. Lee, J.S. et A. Reigber. A new technique for noise filtering of sar interferometric phase images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(05):1456–1465, 09 1998.
- [7] Hongxing Liu, Zhiyuan Zhao et Kenneth C Jezek. Correction of positional errors and geometric distortions in topographic maps and dems using a rigorous sar simulation technique. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(9): 1031–1042, 2004.
- [8] Henri Maître. Traitement des images de rso. *Hermès*, 2001.
- [9] Goldstein R. et Werner C. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical research letters*, 25(21):4035–4038, 10 1998.
- [10] You-H. Wang, F. et X. Fu. Adapted anisotropic gaussian sift matching strategy for sar registration. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(1):160–164, 01 2015.
- [11] Zhang-B.C. Wang, P. et Y.F. Wang. An anisotropic gaussian filter for noise filtering of insar interferogram. *In 2006 CIE International Conference on Radar*, pages 01–04, 10 2006.
- [12] Zhou Wang, Alan C Bovik, Hamid R Sheikh, Eero P Simoncelli et al. Image quality assessment : from error visibility to structural similarity. *IEEE transactions on image processing*, 13(4):600–612, 2004.
- [13] Gang Xu, Yandong Gao, Jin-wei Li et Mengdao Xing. Insar phase denoising : A review of current technologies and future directions. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020.

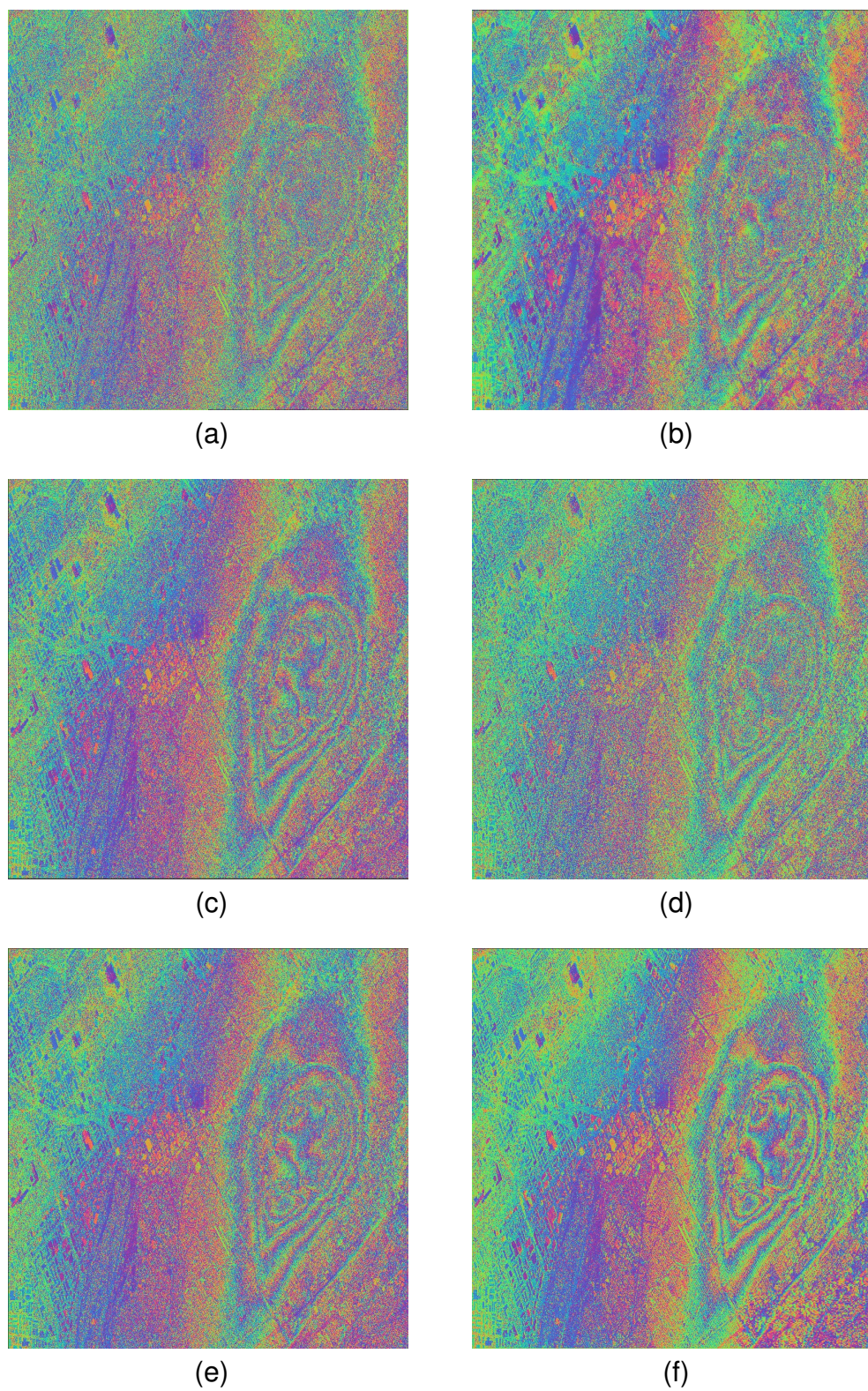


Figure 4.9 : filtered simulated interferogram : (a)Goldstein, (b)Baran, (c)InSAR-Lee, (d)Refined-Lee, (e)Boxcar, (f)PAGF

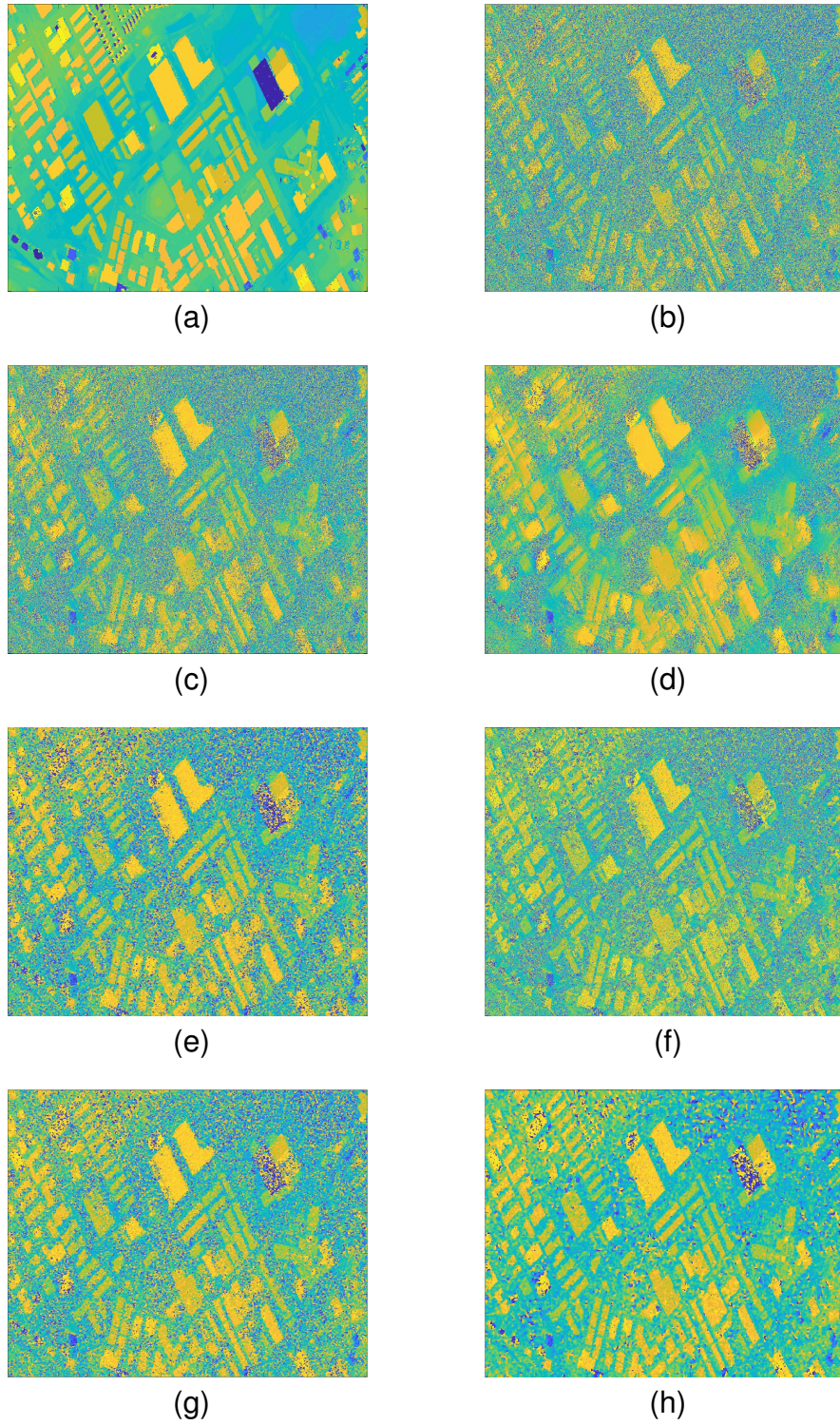


Figure 4.10 : Interferogram subset filtering : (a)Simulated interferogram without noise, (b)Simulated and noised interferogram, (c)Goldstein, (d)Baran, (e)InSAR-Lee, (f)Refined-Lee, (g)Boxcar, (h)PAGF

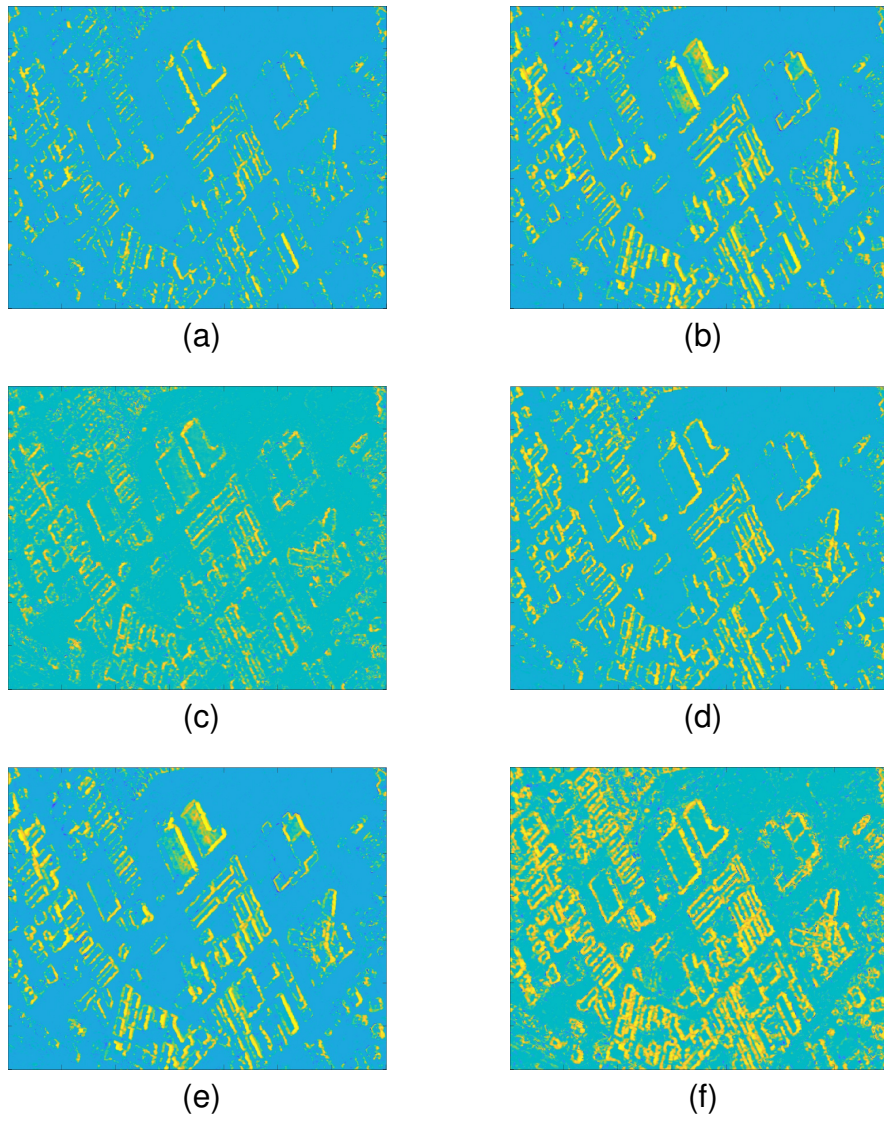


Figure 4.11 : SSIM map for a simulated interferogram : (a)Goldstein, (b)Baran, (c)InSAR-Lee, (d)Refined-Lee, (e)Boxcar, (f)PAGF

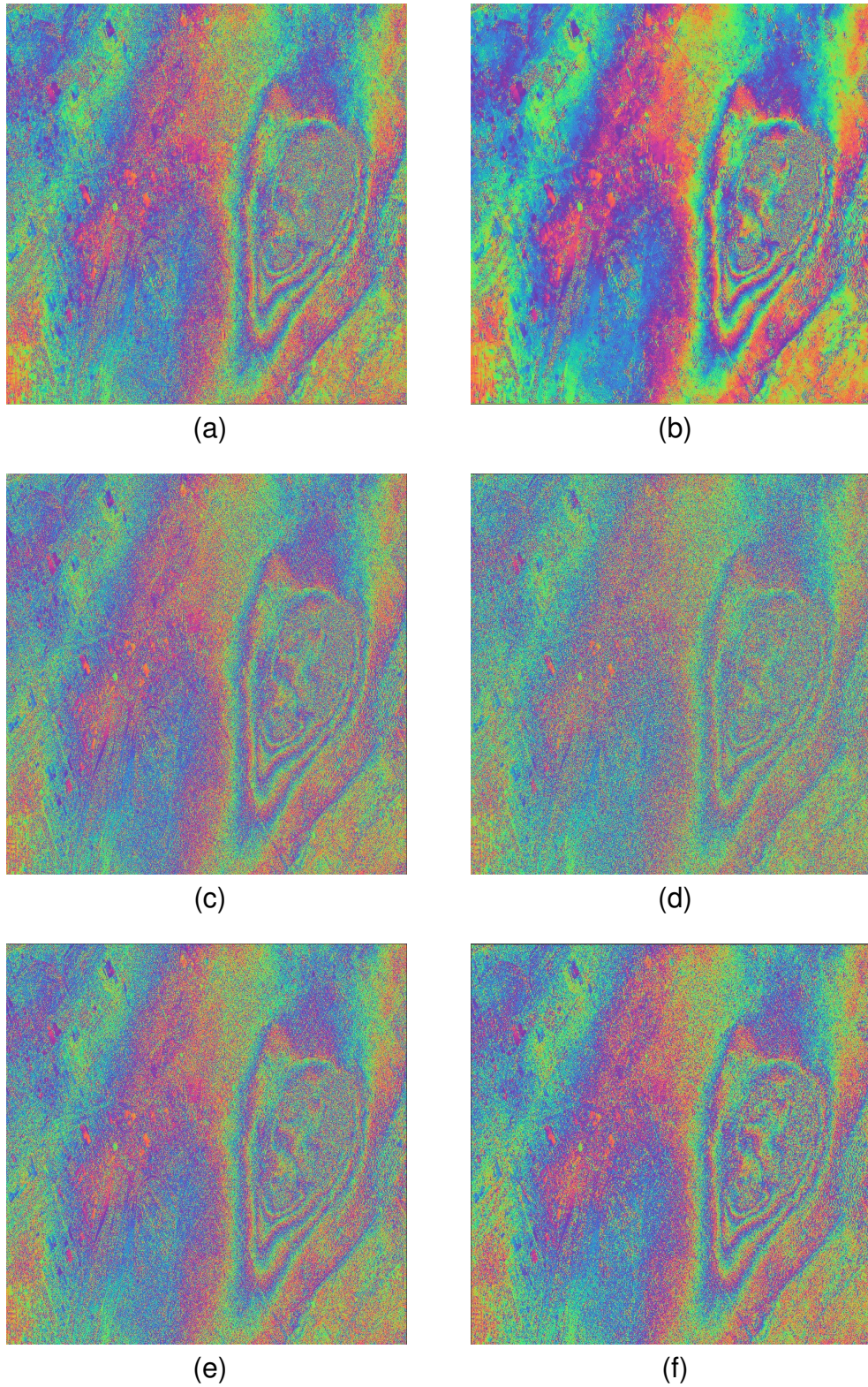


Figure 4.12 : filtered real interferogram : (a)Goldstein, (b)Baran, (c)InSAR-Lee, (d)Refined-Lee, (e)Boxcar, (f)PAGF

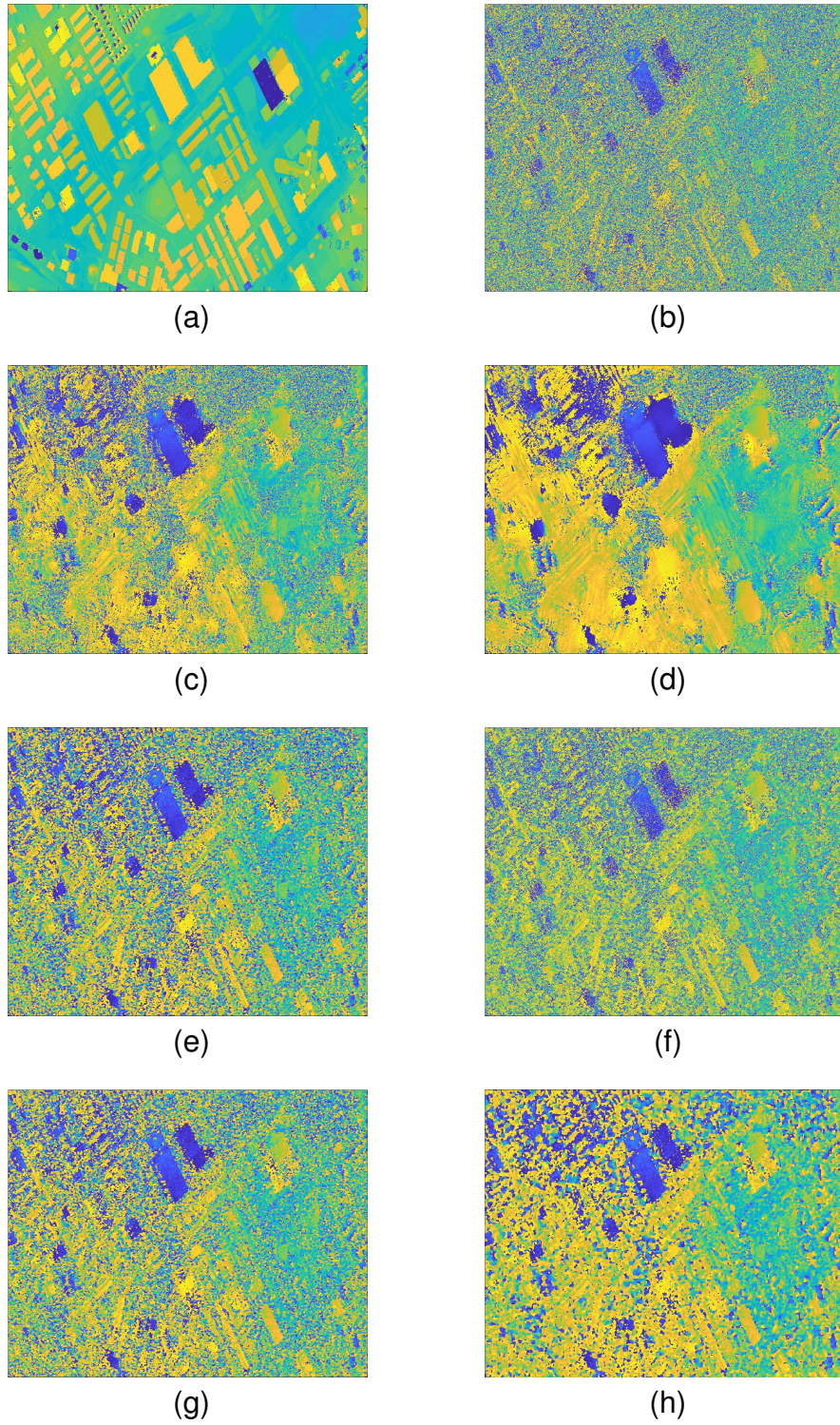


Figure 4.13 : Interferogram subset filtering : (a)Real interferogram without noise, (b)Real interferogram, (c)Goldstein, (d)Baran, (e)InSAR-Lee, (f)Refined-Lee, (g)Boxcar, (h)PAGF

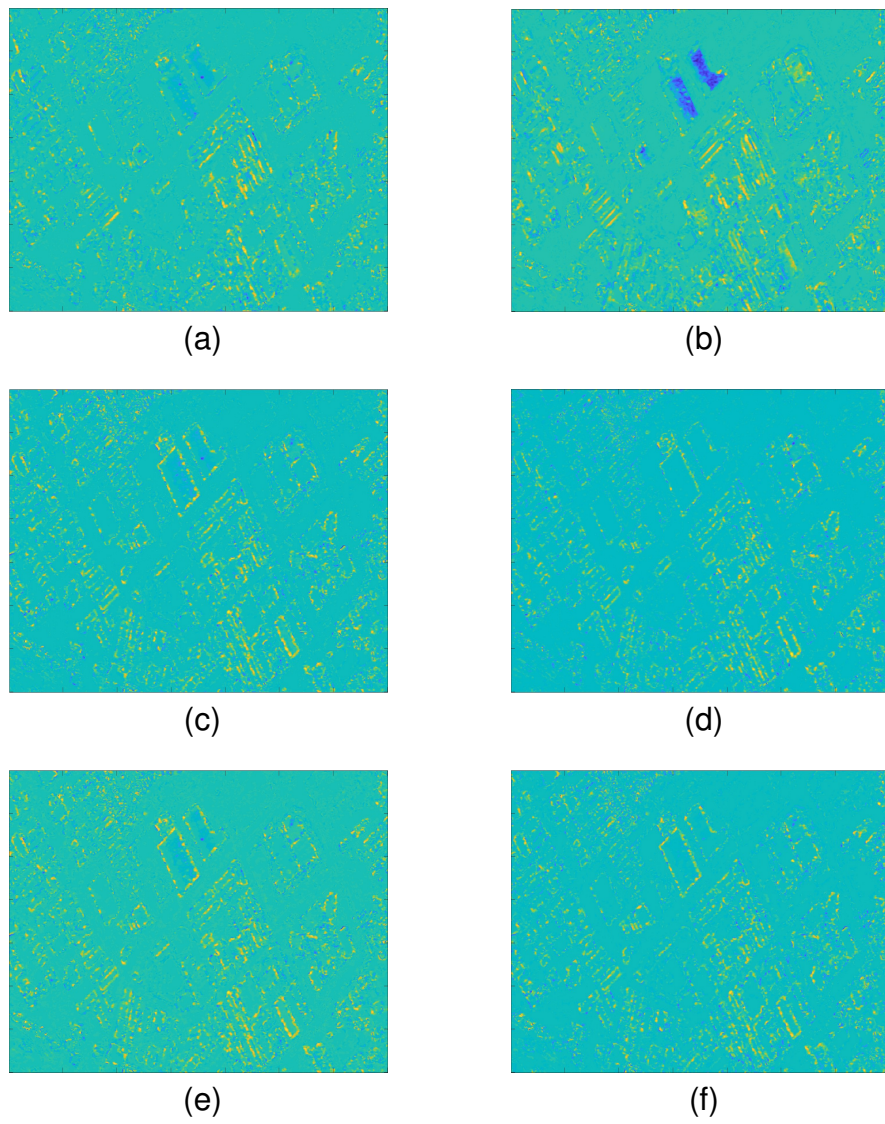


Figure 4.14 : SSIM map for the real interferogram : (a)Goldstein, (b)Baran, (c)InSAR-Lee, (d)Refined-Lee, (e)Boxcar, (f)PAGF

CHAPITRE 5

UNE NOUVELLE MÉTHODE DE DÉROULEMENT DE PHASE INTERFÉROMÉTRIQUE BASÉE SUR UNE MINIMISATION D'ÉNERGIE D'UNE MODÉLISATION CONTEXTUELLE

Résumé

L'objectif de cet article est de présenter un nouveau algorithme de déroulement de phase interférométrique. L'algorithme minimise une fonction de coût basée sur une modélisation contextuelle. Le modèle contextuel mesure la régularité du champ de phase à chaque pixel de l'interférogramme. Des tests de validation avec des interférogrammes réels et simulés ont montré que l'algorithme proposé surpasse les algorithmes standards de déroulement de phase tels que les algorithmes de 'Branch Cuts' , 'Minimum Cost Flow Networks', ou celui de 'Minimum L^p -norm'.

A NEW FORMULATION OF THE ANISOTROPIC ADAPTIVE GAUSSIAN FILTER FOR INTERFEROGRAM DENOISING

Ayoub Tlili^{1,2}, François Cavayas¹, Samuel Foucher²

¹Université de Montréal, Montréal, Canada

²Computer Research Institute of Montreal (CRIM),
Montréal, Canada

October 8, 2020

Abstract

Two-dimensional phase unwrapping is a critical processing procedure of synthetic aperture radar interferometry. This operation becomes even more difficult in the presence of noise. Both local and global unwrapping algorithms are used in obtaining the absolute phase from the wrapped ones. However, there are still gaps in the use of these methods. Local methods still let noise propagate. While the global methods are unable to properly formulate the objective function. The aim of this article is to present a new algorithm for interferometric phase unwrapping. An alternative method to consider both local and global constraints of the interferogram is proposed. Local constraints are modeled by a novel quality measure. A weight is then assigned to each pixel of the interferogram based on two criteria, the phase jump ratio, and the phase gradient. While the global constraints are modeled by a cost function that calculates the sum of the pixels weights in the interferogram. This cost function is minimized by a genetic algorithm. Validation tests with real and simulated interferograms showed that the proposed algorithm outperforms standard algorithms of phase unwrapping such as Branch Cuts, Minimum Cost Flow Networks, or Minimum L^p -norm algorithm.

5.1 Introduction

SAR interferometry is an alternative method to photogrammetric or Lidar surveys for extracting Digital Surface and Terrain Models in urban areas. According to the current state of research, the absolute accuracy of the extracted digital models is about 10 m in urban areas, even when using high resolution X-band images [17][18]. Improvements in the phase unwrapping procedure are a possible way to enhance the accuracy of the extracted digital models. The interferometric phase, which can only be measured modulo 2π , makes the determination of the absolute phase necessary. Phase unwrapping algorithms attempt to deduce the integer number of lost cycles when an interferometric phase measurement is performed. However, in the case of noisy images, the uniqueness of the solution is no longer ensured for several reasons, including the layover effect or other geometrical effects, interferometric noise, phase discontinuities, and the so-called

residual points; where the phase corrected at these points is not the same according to the direction of the integration path. Different methods of phase unwrapping have been proposed. They can be classified according to the local or global nature of the algorithm. Local methods [4, 7, 9, 13, 19, 23] consist in integrating the point-to-point phase by choosing an integration path without ambiguous points. These techniques are robust and easy to implement, but the propagation of errors in the presence of noise is their weak point. Global methods [5, 6, 21, 24] consist in solving the phase unwrapping problem based on a global optimization function. Since the distribution of phase jumps in an interferogram is often very arbitrary, such solution can lead to unrealistic results. Methods that effectively exploit both local and global constraints, such as those based on Markov random fields, can improve phase unwrapping results [1, 15, 16, 26]. Their strength lies in their ability to consider contextual information and the fact that they are only based on direct assumptions in the context of the pixel with its neighborhood. They do not need an exact probability distribution function of the observed phase and noise term. However, they cannot cope with phase discontinuities. Added to that, the choice of using the optimization method is not so obvious.

In this article, an alternative method to consider both local and global constraints of the interferogram is proposed. Local constraints are modeled by a novel quality measure. This measure assigns a weight to each pixel of the interferogram according to two criteria, the phase jump ratio and the phase gradient. The first criterion is the ratio between the number of pixels that present a phase jump with the central pixel p and the total pixel number within a sliding window. The second criterion is the magnitude of the gradient of the pixel p estimated using a boxcar gradient operator. Global constraints are modeled by a cost function that is defined by the sum of all pixel costs in the interferogram. This function is minimized by a genetic algorithm. This algorithm is capable of converging to a global minimum at a reasonable time [2, 22].

The article is organized as follows. Section 5.2 presents the theoretical framework of the proposed algorithm. Section 5.3 describes the data used in this study. Section 5.4 compares and discusses the results of the proposed phase unwrapping method to those

of other phase unwrapping methods. Finally, section 5.5 concludes this article.

5.2 Proposed Phase Unwrapping Algorithm

5.2.1 Contextual modeling of the phase field

As mentioned above, the problem of phase unwrapping is to find, on a pixel basis p , the appropriate integer number k of 2π radians for converting the measured interferometric phase Φ to an absolute phase Ψ :

$$\Psi = \Phi + 2\pi k \quad (5.1)$$

Phase jumps in the interferogram appear when the absolute value of the phase difference between two neighboring pixels is greater than π . In the case of InSAR images, the presence of interferometric noise can significantly alter the information on phase jumps. Such noise is due to low interferometric coherence, phase discontinuities, abrupt topographic changes, surface deformation or radar shadow and layover [25]. In addition, in urban areas, variations in the gradient due to variations in building heights can lead to additional phase jumps. The challenge is therefore to distinguish between real phase jumps caused by topography and phase jumps caused by interferometric noise and local variation of the phase gradient.

The quality-guided phase unwrapping (QGPU) technique [4, 9, 13, 19, 23] associates a quality measure to each pixel in the interferogram by measuring the phase regularity between that pixel and its surrounding pixels. This measure is then used to guide the phase unwrapping algorithms to find the best integration path by avoiding ambiguous pixels. The technique is generally robust to interferometric noise, however, the way that the quality measure is estimated can significantly affect the phase unwrapping results depending on the studied terrain [13, 23]. The quality measure proposed in this article is expected to be robust to the interferometric noise and less dependent on the type of terrain. It is calculated for each pixel of the interferogram based on two parameters, phase jump ratio and phase gradient. The first parameter is used to differentiate between

phase jumps caused by local variations, such as building heights or data gaps, and phase jumps caused by topography. The second parameter is used to detect fringe boundaries and ignore areas where interferometric coherence is low.

5.2.1.1 Phase jump ratios

The phase jump ratios are computed within a sliding window of size $2n + 1$ centered at each pixel p in the interferogram I as follows :

$$v_n = \frac{\sum_{x,y=-n}^n g(x,y)}{(2n+1)^2 - 1} \quad (5.2)$$

where,

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{if } \phi(i,j) - \phi(i+x,j+y) < -\pi \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.3)$$

with $x,y \in [-n,n]$. In other words, the function v_n is the ratio between the number of pixels that present a phase jump with the central pixel p and the total of number of pixel within the window of size $(2n+1) \times (2n+1)$.

A pixel p is considered as a phase jump if $v_{n=1}(p) > 0$. Furthermore, another phase jump ratio is calculated with a larger window ($n > 1$) to distinguish phase jumps associated with steep topography from those caused by local gradient variations such as building heights or data gaps (e.g., due to layover or other geometrical effects).

In Eq. 5.3, using conditions $(\phi(i,j) - \phi(i+x,j+y) < -\pi)$ or $(\phi(i,j) - \phi(i+x,j+y) > \pi)$ leads to the same results. Using the absolute value $(abs(\phi(i,j) - \phi(i+x,j+y)) > \pi)$ leads to an infinite loop.

The Fig. 5.1 shows different terrains with different types of phase jumps. Each sub-image corresponds to a type of phase jump in a windows of 21×21 pixels. In the following, we will present an example of calculation of the phase jump ratio for each central pixel of each sub-image. The black color is used in Fig. 5.1 to indicate the central pixel.

If we apply the Eq. 5.3 of the phase jump ratio to these black pixels, the results

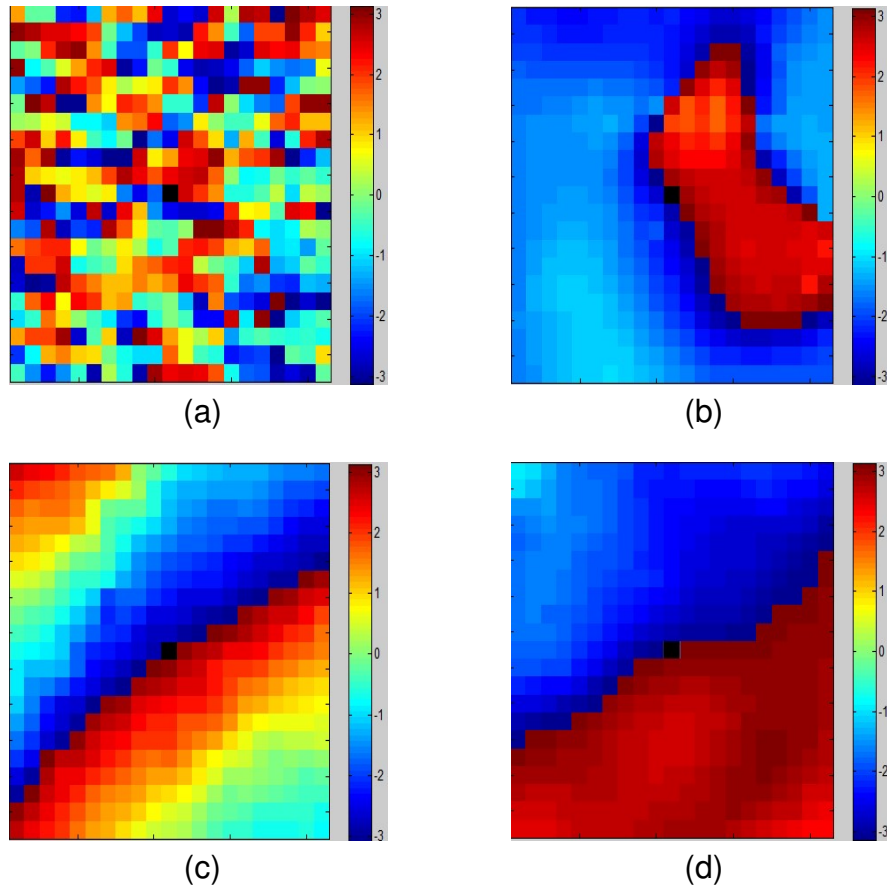


Figure 5.1 : Different types of phase jumps in an interferogram caused by : coherence loss (a), a building height (b), topography (c) and (d) with a steeper topography in (c). The black pixel indicates the central pixel.

according each sub-image are :

$$\begin{aligned}
 Fig.1(a) & \begin{cases} v_{n=1}(p) = 0.5 \\ v_{n=5}(p) = 0.62 \\ v_{n=10}(p) = 0.46 \end{cases} \\
 Fig.1(b) & \begin{cases} v_{n=1}(p) = 0.5 \\ v_{n=5}(p) = 0.5 \\ v_{n=10}(p) = 0.23 \end{cases}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Fig.1(c)} & \begin{cases} v_{n=1}(p) = 0.5 \\ v_{n=5}(p) = 0.46 \\ v_{n=10}(p) = 0.47 \end{cases} \\
\text{Fig.1(d)} & \begin{cases} v_{n=1}(p) = 0.5 \\ v_{n=5}(p) = 0.5 \\ v_{n=10}(p) = 0.48 \end{cases}
\end{aligned}$$

$v_{n=1}(p) = 0.5$ means that the central pixel has 4 phase jumps with its direct neighborhood in a 3×3 window. For a 11×11 window ($n = 5$), all the 4 pixels in Fig. 5.1 have the same ratio. If we move to a 21×21 window ($n = 10$), we can differentiate between phase jumps caused by topography and those caused by the building height. The size of this window depends on the size of the objects in the interferogram. The larger the window size is, the more efficient it becomes. On the other hand, a very large window can lose its efficiency in detecting fringes in an area with a steep topography.

Moreover, several tests on interferogram data, show that, if the following condition is verified

$$\begin{cases} v_{n=1}(p) > \beta \\ v_{n>1}(p) > \beta \\ \beta \in [0.3, 0.4] \end{cases} \quad (5.4)$$

then the pixel p has a good chance to belong to a fringe.

Finally, we can see that this parameter is not able to distinguish between phase jumps caused by topography and those caused by a loss of coherence. This is the main reason to introduce the second parameter, the phase gradient.

5.2.1.2 Phase gradient

To properly detect the fringe boundaries and at the same time avoid noisy areas in interferograms, the magnitude of the phase gradient is measured. In [4] the quality measure is calculated using a Laplacian filter. However, a Laplacian is a high-pass filter that is very sensitive to noise. Thus, it is less appropriate for an interferogram. To address this problem, several authors have proposed to increase the size of the border detection

masks [14]. The Boxcar gradient, which is the extension of the Prewitt filter mask, can be extended to any size. In addition, these operators can be rotated horizontally H_h , vertically H_v , and diagonally H_{d1} and H_{d2} , allowing the magnitude of the gradient to be calculated in different directions. Let G be a function that calculates the magnitude of the gradient of the pixel p within a given window ;

$$G = \max\{|G_h|, |G_v|, |G_{d1}|, |G_{d2}|\} \quad (5.5)$$

where G_h , G_v , G_{d1} and G_{d2} are the gradients of the pixel p respectively in a horizontal, vertical, diagonal of 45° , and diagonal of 135° direction.

$$\begin{cases} G_h = H_h * \phi_h \\ G_v = H_v * \phi_v; H_v = Rot_{+90}(H_h) \\ G_{d1} = H_{d1} * \phi_{d1}; H_{d1} = Rot_{+45}(H_h) \\ G_{d2} = H_{d2} * \phi_{d2}; H_{d2} = Rot_{+135}(H_h) \end{cases} \quad (5.6)$$

$$H_h = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Figure 5.2 : Example of boxcar gradient operator : window of 7×7 ; horizontal direction

To ensure that G is always between 0 and 1, it is divided by $f(f-1)\pi$, where $f \times f$ is the size of the Boxcar gradient operator.

As in the case of the phase jump ratio parameter, the phase gradient parameter is applied to the sub-images in Fig.5.1. According to the window size, the results for each sub-image are :

$$\begin{aligned}
Fig.1(a) & \begin{cases} 7 \times 7 : G = 0.11 \\ 11 \times 11 : G = 0.07 \\ 21 \times 21 : G = 0.06 \end{cases} \\
Fig.1(b) & \begin{cases} 7 \times 7 : G = 0.68 \\ 11 \times 11 : G = 0.57 \\ 21 \times 21 : G = 0.26 \end{cases} \\
Fig.1(c) & \begin{cases} 7 \times 7 : G = 0.71 \\ 11 \times 11 : G = 0.55 \\ 21 \times 21 : G = 0.26 \end{cases} \\
Fig.1(d) & \begin{cases} 7 \times 7 : G = 0.83 \\ 11 \times 11 : G = 0.75 \\ 21 \times 21 : G = 0.64 \end{cases}
\end{aligned}$$

This parameter is very sensitive to noise caused by low coherence values. Moreover, with a large window, this parameter is able to differentiate between steep and smooth topography.

5.2.1.3 Proposed quality measure

The proposed quality measure for a pixel p , can be described as follows :

$$C(p) = v_1(p) \times v_n(p) \times G(p) \quad (5.7)$$

Where, $v_1(p)$ and $v_n(p)$ are the phase jump ratios, respectively, for 3×3 and $(2n + 1) \times (2n + 1)$ window ($n > 1$), and $G(p)$ is the phase gradient parameter. $C(p)$ varies between 0 and 1 ; a value near unity means that pixel p is good to be unwrapped while a value toward zero indicates a noisy pixel.

The application of this quality measure to the sub-images in Fig. 5.1 gives the following results :

$$\begin{aligned}
\text{Fig.1(a)} & \begin{cases} 7 \times 7 : C(p) = 0.06 \\ 11 \times 11 : C(p) = 0.02 \\ 21 \times 21 : C(p) = 0.01 \end{cases} \\
\text{Fig.1(b)} & \begin{cases} 7 \times 7 : C(p) = 0.17 \\ 11 \times 11 : C(p) = 0.13 \\ 21 \times 21 : C(p) = 0.03 \end{cases} \\
\text{Fig.1(c)} & \begin{cases} 7 \times 7 : C(p) = 0.16 \\ 11 \times 11 : C(p) = 0.13 \\ 21 \times 21 : C(p) = 0.06 \end{cases} \\
\text{Fig.1(d)} & \begin{cases} 7 \times 7 : C(p) = 0.2 \\ 11 \times 11 : C(p) = 0.16 \\ 21 \times 21 : C(p) = 0.15 \end{cases}
\end{aligned}$$

According to this measure, the central pixel of Fig. 5.1(d) is the one that has the highest priority to be unwrapped first. The pixel in Fig. 5.1(a) has the lowest value, it will be considered as a noisy pixel and then ignored by the unwrapping process. The pixels in Fig. 5.1(b) and (c) will be kept at the end of the unwrapping process. If we applied the condition in Eq. 4, the pixel in Fig. 5.1(b) will not be considered as a pixel with a phase jump. Finally, the phase unwrapping algorithm must consider all these conditions.

5.2.2 Cost function

The traditional QGPU phase unwrapping process starts with the pixel with the highest cost and continues with the lowest cost pixels until all pixels in the interferogram have passed through. In our approach, the phase unwrapping problem is modelled as a global minimization of a cost function. This cost function calculates the sum of all cost pixels $C(p)$ in interferogram. Let \mathbf{x} be a realization of the phase jumps distribution in the interferogram I , and $f(\mathbf{x})$ is the sum of the cost pixels in I relative to the realization \mathbf{x} :

$$f(\mathbf{x}) = \sum C(p) \quad (5.8)$$

The optimization problem is to find the optimal realization \mathbf{x}_{opt} where the energy $f(\mathbf{x})$ is minimal. The problem of phase unwrapping is therefore to minimize the cost function $f(\mathbf{x})$.

$$\mathbf{x}_{opt} = \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \quad (5.9)$$

5.2.3 Optimization

Several optimization algorithms are used for the phase unwrapping based on random Markov fields [26]. Most of these models use the simulated annealing method [15] or the iterative conditional model ICM [26]. Simulated annealing can converge toward a global minimum but it is time-consuming. While ICM is relatively faster than simulated annealing, it can lock at a local minimum. In recent years, some studies have suggested the use of a genetic algorithm to minimize an energy function used for phase unwrapping problem, this is able to converge to a global minimum at a reasonable time [2, 22]. In this article a genetic algorithm is used to minimize the cost function $f(x)$ detailed below (Eq. 5.8).

Genetic algorithms methods for solving optimization problems based on natural selection, the process that drives biological evolution [12]. At each step, the genetic algorithm selects the best individuals using a fitness value from the current population. This fitness value, is used to reflect the degree of goodness of the individual for solving the problem, and this value is closely related to its objective value. The selected individuals become parents and are used to produce the children for the next generation. Over successive generations, the algorithm evolves toward an optimal solution. This algorithm is based on four main steps : initialization, selection, crossover, and evaluation. Those steps as used in our case are as follows :

1. *Initialization* : the initial population list is generated using the condition of Eq. 5.4.

2. *Selection* : the cost pixel function $C(p)$ is used as the fitness function to measure the goodness of the pixels. A selected pixel p must have a cost function $C(p)$ higher than the median of all cost pixels in the population.

3. *Crossover* : the selected pixels in the previous step are unwrapped by adding 2π . These pixels become parents and their children are their neighboring pixels. The children replace the parents in the initial population.

4. *Evaluation* : steps 1, 2, and 3 are repeated until a termination condition is reached. The termination condition is a solution that satisfies a minimum criteria, or a fixed number of generations is reached, or successive iterations no longer produce better results.

The optimization is similar to the region growing, selecting seeds according to Eq. 5.4 and driving the region growing gradually according to the priority value of Eq. 5.7 updated iteratively. In the beginning, the seeds in the initial population list might be separated, but the subsequent selection (children) must be a direct neighbor to the parent seeds in a 3×3 window. The algorithm gradually converges by scanning the entire image in a similar manner to the region growing algorithm. Fig. 5.3 and 5.4 show more details about the optimization algorithm. Fig. 5.3 and 5.4 shows more details about the optimization algorithm. The calculation complexity of this algorithm is $\Theta(n^2)$ (Fig. 5.3).

5.3 Data used

Real and simulated InSAR data used in this study are described in the next sections.

5.3.1 Real InSAR data

Several Radarsat-2 images covering a part of the city of Montreal (Quebec, Canada) acquired during the summer of 2018 were available for our study. We chose a pair of images acquired in ultra-fine mode on June 5 and 29 in HH polarization mode for the following reasons : 1) they were acquired with a 24 days interval thus reducing the probability of coherence loss due to environmental variations ; 2) they offer the highest possible resolution of Radarsat-2 images (about 3.5 m) suitable for urban DEM extraction ; 3) their polarization mode (HH) offers a high signal-to-noise ratio ; and 4) with their 300 meters baseline, we maintain consistency while reducing the ambiguity height. Their low incidence angle of 23 degrees is, to some extent, problematic in urban areas

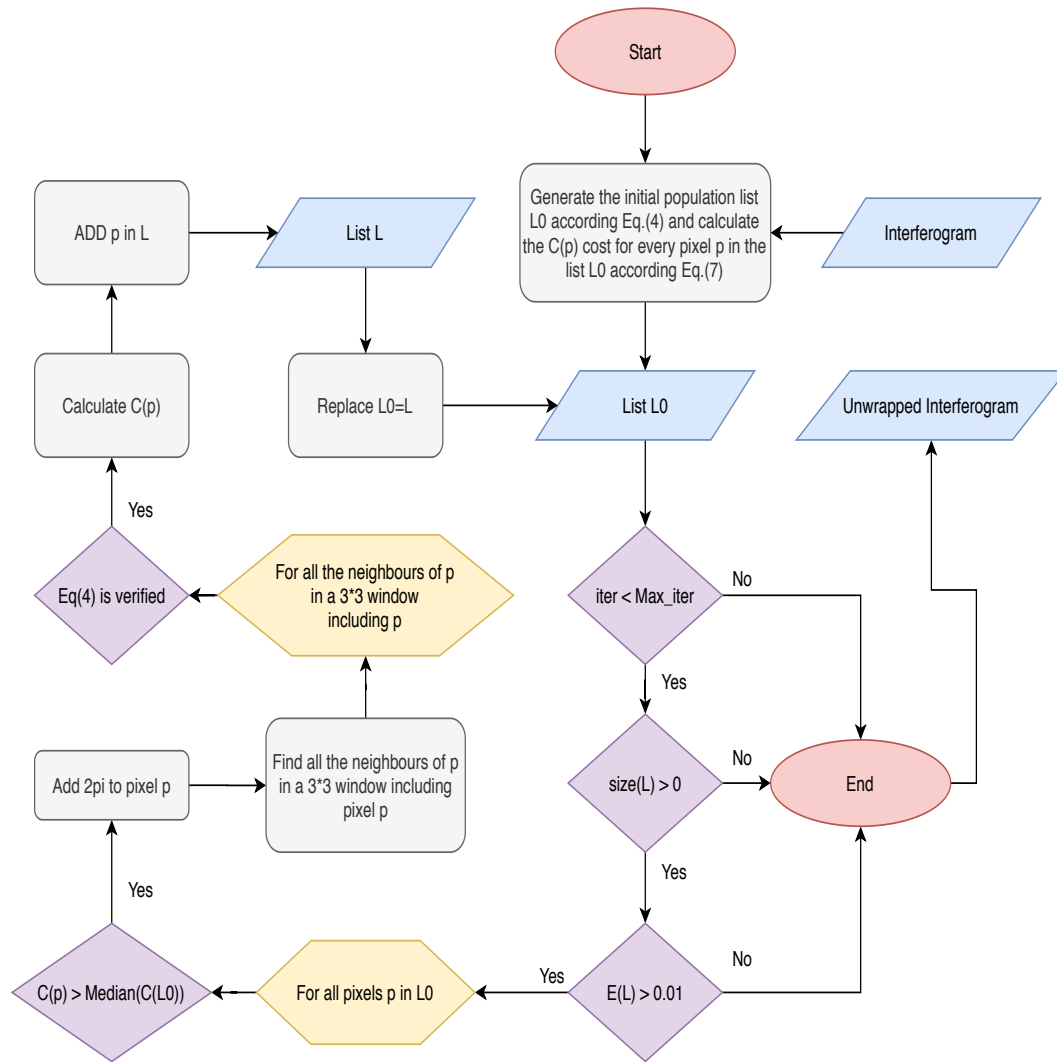


Figure 5.3 : Flowchart of the phase unwrapping algorithm where $iter$ is the iteration number, and $E(L)$ is the energy system given by the ratio between the sum of all pixel costs in a given iteration and the number of iterations

because it exacerbates the layover problem of high buildings and thus the phase jumps. On the other hand, phase discontinuities due to shadows are minimized and the phase difference becomes more sensitive to variations of topography [3].

The InSAR processing consists of three steps : co-registration of the two SAR images, formation and filtering of the interferogram. For the filtering, the Goldstein filter was applied. These steps were carried out using the SNAP software of the ESA (European

Space Agency). Fig. 5.6 shows the results.

5.3.2 Simulated InSAR data

In order to evaluate the behavior of the proposed phase unwrapping algorithm under various scene conditions, such as presence of steep topography or of high density of buildings, we generated two simulated images.

The first is a sub-image from a Digital Terrain Model (DEM) of a region of Montreal island (Quebec, Canada) (Fig. 5.7). This image covers an area of 2×3.2 kilometers with steep topography. This is demodulated and an interferometric phase noise is added on it according to the one-look phase probability density function pdf [11] :

$$pdf(\phi_{ij} = \phi) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{1 - \gamma^2}{1 - y^2} \times \left\{ 1 + \frac{y}{\sqrt{1 - y^2}} \cos^{-1}(-y) \right\} \quad (5.10)$$

Where γ is the interferometric coherence, $y = \gamma \times \cos(\phi - \psi)$, ψ is the real phase, and ϕ is a random angle : $-\pi \leq \phi \leq \pi$. By changing the value of the interferometric coherence γ from 0.6 to 0.3 the interferometric noise level is changed on this image (Fig. 5.7).

To closely emulate the characteristics of the real SAR image in urban areas, the second simulated image is generated using a SAR simulation technique as proposed in [10]. This technique considers the motion of the SAR sensor, and the geometric distortions due to earth curvature and topographic effects (layover, foreshortening, and radar shadows). The simulation algorithm maps each cell of a given DSM Fig. 5.8(a) to an image pixel in the slant range R_s geometry. From this image, it generates a local incidence angle φ and the backscattered power (brightness value) for each pixel according to Muhleman backscatter model [8].

Using the slant range R_s and the local incidence angle φ generated by the simulation algorithm, the interferometric phase difference Δ_ϕ is calculated as follow :

$$\Delta_\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{b_n}{R_s \sin(\varphi)} \times h \quad (5.11)$$

Where λ is the radar wavelength, b_n is the perpendicular baseline, and h is the DSM altitude.

To generate a simulated noisy interferogram *SNI*, the probability density function of the phase noise (Eq. 5.10) is used (Fig. 5.8(b)). The γ value is taken from the real coherence image (Fig. 5.6(b)). Added to that, the resulting image (Fig. 5.8(b)) is demodulated according to the following equation :

$$\Delta_\phi = (\pi + \Delta_\phi) \bmod 2\pi - \pi \quad (5.12)$$

5.4 Results and discussions

The proposed phase unwrapping algorithm (PA) and other standard algorithms (Branch Cuts (BC) [7], Minimum Cost Flow Networks (MCF)[5], and the Minimum L^p -norm (LS) [6]) were applied to the interferograms (Fig. 5.6(c), 5.7(b), 5.7(c), and 5.8(d)). The results of these methods were compared to the original simulated images Fig. 5.7(a) and 5.8(b). The mean squared error and the structural similarity index (SSIM)[20] are used to compare the results of those methods (Table 5.I and Table 5.II). The SSIM is calculated locally to evaluate the performance of the unwrapping algorithms to maintain the local variation of the phase gradient. SSIM combines local image structure, luminance and contrast into a single local quality score. The SSIM value is between -1 and 1, a high SSIM means a great similarity between the two compared images.

For the proposed algorithm, the size of the window used to calculate the phase jumps ratio and the Boxcar operator depends on the size of the fringes and objects in the interferogram. The best results are obtained respectively with a 41×41 for the interferograms Fig. 5.6(c) and 5.8(d) and a 7×7 for the interferograms Fig. 5.7(b) and 5.7(c).

For the interferogram Fig. 5.7(b), an interferometric noise is added corresponding to an interferometric coherence $\gamma = 0.6$. On this interferogram, the four phase unwrapping

methods give good results, with an advantage to PA and BC methods over MCF and LS methods (Table 5.I and Table 5.II). This advantage is explained by the fact that the PA and BC algorithms add a multiple of (2π) to the pixels to be corrected without affecting the original values of the interferogram, unlike the MCF and LS methods which modify the original values of the interferogram. For the interferogram Fig. 5.7(c), the interferometric noise frequency is increased by decreasing the interferometric coherence value from 0.6 to 0.3. The variation in interferometric noise frequency due to a variation in interferometric coherence does not lead to a large change in the results of the global phase unwrapping methods MCF (Fig. 5.9(b) and 5.10(b)) and LS (Fig. 5.9(c) and 5.10(c)). In fact, this variation affects the results of the BC method (Fig. 5.9(a) and 5.10(a)), which is obvious, given the principle of this method which considers noisy pixels as residues (source of noise), it therefore tries to avoid them. As mentioned in the previous section, interferogram Fig. 5.7(d) was generated from a DSM from an urban area using a SAR simulation technique [10]. On this interferogram, the variation in phase gradient caused by variations in building heights led to additional phase jumps. These phase jumps caused error propagations for the BC and MCF algorithms (Fig. 5.10(a) and 5.11(b)). Using the phase jumps ratio as a quality measure, the PA can detect these phase jumps and ignore them throughout the phase process. In this case the PA gives the best results (Fig. 5.11(d)) compared to other BC (Fig. 5.11(a)); MCF (Fig. 5.11(b)) and LS (Fig. 5.11(c)) and this is confirmed with the two quality measurements (RMSE and SSIM). In the case of the real interferogram Fig. 5.6(c), the development of interferometric noise makes the phase unwrapping task very complicated, which leads to unrealistic results for the BC (Fig. 5.12(a)), MCF (Fig. 5.12(b)), and LS (Fig. 5.12(c)) algorithms. While the PA gives results comparable to those of simulated images (Fig. 5.11(d) and Fig. 5.12(d)).

We have evaluated the computing cost of the proposed algorithm compared to other standard algorithms. Table 5.III shows the computing times for each algorithm in relation to each image. Knowing that the machine used is an Intel(R) with a speed of 3.5 GHz, 32GB RAM, and 64-bit operating system. At this level, the best results are obtained by the LS algorithm. Although the optimization algorithm used is an NP-hard problem

algorithm, its execution time is quite acceptable compared to other standard algorithms. This is because the algorithm is only applied to a list of pixels and not to the whole image. The list contains the costs of the pixels and their references on the image. The entire image is only browsed once when building the initial list.

Tableau 5.I : Mean Squared Error values. PA is the proposed algorithm, BC is the Branch Cuts algorithm, MCF is the Minimum CostFlow Networks algorithm, and LS is the Minimum L^p -norm algorithm

Fig.	BC (a)	MCF (b)	LS (c)	PA (d)
5.9	32	61.4	75.2	18.8
5.10	42.5	61.9	75.3	19.4
5.11	11.81	7.7	4.65	3.71
5.12	24.94	23.65	13.4	3.74

Tableau 5.II : Structural similarity index (SSIM) values

Fig.	BC (a)	MCF (b)	LS (c)	PA (d)
5.9	0.55	0.24	0.39	0.66
5.10	0.32	0.15	0.2	0.48
5.11	8×10^{-2}	-6.7×10^{-2}	0.25	0.31
5.12	-6.5×10^{-2}	-7.2×10^{-2}	-6.4×10^{-2}	0.2

Tableau 5.III : Running times cost in seconds for the different algorithms

Fig.	Image size (pixels)	BC	MCF	LS	PA
5.9	401×251	11.4	14.9	0.15	16.7
5.10	401×251	12.4	28.5	0.12	15.9
5.11	1570×1100	23.5	111.3	1.3	207.4
5.12	1570×1100	25.2	139.7	1.17	136.3

5.5 Conclusion

A new phase unwrapping algorithm is presented in this article. It consists in minimizing a cost function with a genetic algorithm. This cost function is based on a contextual

modeling that measures the sum of pixel costs in an interferogram. The cost attributed to each pixel is a function of a regularity index, which is estimated from the number of phase jumps and the phase gradient within a given sliding window. Validation tests with simulated images and RADARSAT-2 images (HH polarization; fine mode) covering a region of the Island of Montreal confirm the performance of the proposed method. Indeed, compared to standard methods [5–7], the proposed method is very reliable in terms of interferometric noise. In addition, the RMSE and the SSIM indicates that the proposed algorithm generates the best results. In this article, the size of the window used to calculate the phase jumps ratio as a quality measure is fixed. An improvement can be made at this level by making this window dynamic, with the window size changing according to the size of the fringes in the interferogram.

Acknowledgement

This project was financed by Canadian Space Agency (SOAR program), NSERC and the Ministère de l'Économie et de l'Innovation (MEI) of the province of Québec.

Bibliographie

- [1] Wajih Ben Abdallah et Riadh Abdelfattah. Mrf model based approach for simultaneous insar phase filtering and unwrapping. Dans *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages 33–36. IEEE, 2014.
- [2] Wajih Ben Abdallah et Riadh Abdelfattah. A joint markov random field approach for sar interferogram filtering and unwrapping. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(7):3016–3025, 2016.
- [3] Olivier Cavalié. *Mesures InSAR et modélisation de faibles déformations d'origine anthropique (lac Mead, USA) ou tectonique (faille de Haiyuan, Chine)*. Thèse de doctorat, 2007.
- [4] K. Chen, J. Xi et Y. Yu. Fast quality-guided phase unwrapping algorithm for 3d

- profilometry based on object image edge detection. *IEEE Computer Society Conference*, pages 64–69, 06 2012.
- [5] M. Costantini. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Trans. on Rem. Sens. and Geo.*, 36(3):813–21, 05 1998.
 - [6] D. Ghiglia et L. Romero. Minimum lp-norm two-dimensional phase unwrapping. *JOSA A*, 13(20):1999–2013, 10 1996.
 - [7] R. Goldstein, H. Zebker et C. Werner. Satellite radar interferometry : Two dimensional phase unwrapping. *Radio science*, 23(4):713–20, 07 1988.
 - [8] Franz W Leberl. Radargrammetric image processing. Rapport technique, Artech House, 1990.
 - [9] Qingliang Li, Chunyu Bao, Jiashi Zhao et Zhengang Jiang. A new fast Quality-Guided Flood-Fill phase unwrapping algorithm. *J Phys Conf Ser*, 1069(1):012182, 2018. ISSN 1742-6596.
 - [10] Hongxing Liu, Zhiyuan Zhao et Kenneth C Jezek. Correction of positional errors and geometric distortions in topographic maps and dems using a rigorous sar simulation technique. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(9):1031–1042, 2004.
 - [11] Henri Maître. *Traitement des images de RSO*. 2001.
 - [12] Kim-Fung Man, Kit-Sang Tang et Sam Kwong. Genetic algorithms : concepts and applications [in engineering design]. *IEEE transactions on Industrial Electronics*, 43(5):519–534, 1996.
 - [13] Yan Man, Liu Goulin et Hao Huadong. Comparison among quality maps applying in phase unwrapping for different terrain. Dans *2010 International Conference on Computational and Information Sciences*, pages 804–807. IEEE, 2010.
 - [14] W. Pratt. *Introduction to digital image processing*. CRC Press, 09 2013. ISBN 9781482216691.

- [15] R. Wang G. Liu Y. Shao R. Chen, W. Yu. Integrated denoising and unwrapping of insar phase based on markov random fields. *IEEE Trans. on Rem. Sens. and Geo.*, 51(8):4473–85, 08 2013.
- [16] G. Pasquariello L. Guerriero S. Stramaglia, G. Nico. Phase-unwrapping method based on stochastic relaxation. *In Image Processing, Signal Processing, and Synthetic Aperture Radar for Remote Sensing*, 3217:4–13, 12 1997.
- [17] U. Sefercik. Productivity of terrasar-x 3d data in urban areas : A case study in trento. *European Journal of Remote Sensing*, 46(1):597–612, 01 2013.
- [18] U. Sefercik. Dem extraction in urban areas using high-resolution terrasar-x imagery. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 42(2):279–90, 06 2014.
- [19] Xian Wang, Suping Fang, Xindong Zhu et Yichao Li. Phase unwrapping of interferometric fringes based on a mutual information quality map and phase recovery strategy. *Opt Eng*, 57(11):114108, 2018. ISSN 0091-3286.
- [20] Zhou Wang, Alan C Bovik, Hamid R Sheikh, Eero P Simoncelli et al. Image quality assessment : from error visibility to structural similarity. *IEEE transactions on image processing*, 13(4):600–612, 2004.
- [21] Huaping Xu, Shuo Li, Yanan You, Aifang Liu et Wei Liu. Unwrapped phase estimation via normalized probability density function for multibaseline InSAR. *Ieee Access*, PP(99):1–1, 2018.
- [22] Zhang Yan et Xing ZiJian. A hybrid phase unwrapping algorithm based on quality-guided and surface-fitting. Dans *2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics : Applications and Student Innovation Competition (iWEM)*, pages 1–2. IEEE, 2018.
- [23] Hanwen Yu, Yang Lan, Yuan Zhihui, Junyi Xu et Hyongki Lee. Phase unwrapping in insar : A review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 7:40–58, 03 2019.

- [24] L. Zhang F. Gao Y. Qin H. Du Z. Zhao, H. Zhao. 2d phase unwrapping algorithm for interferometric applications based on derivative zernike polynomial fitting technique. *Measurement Science and Technology*, 26(1):017001, 1 2015.
- [25] Howard A Zebker et John Villasenor. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 30(5):950–959, 1992.
- [26] Lifan Zhou, Dengfeng Chai, Yu Xia et Peifeng Ma. Comparison of optimization algorithms for interferometric synthetic aperture radar phase unwrapping based on identical markov random fields. *J Appl Remote Sens*, 12(2):025016, 2018. ISSN 1931-3195.

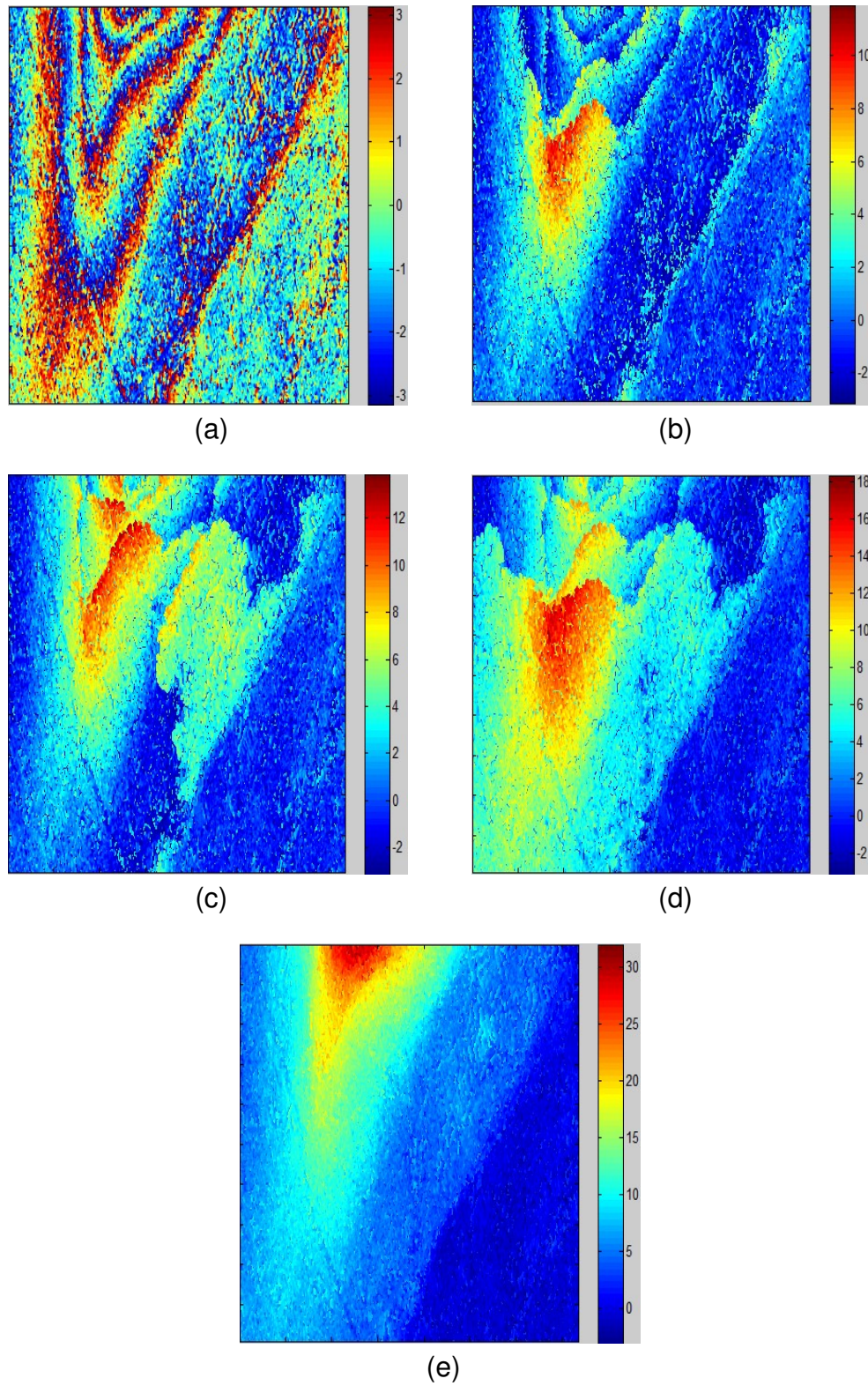


Figure 5.4 : Processing data of the optimization algorithm as a function of the number of iterations ((a) Initial interferogram (b) After 200 ; (c) 500 ; (d) 1000 (e) 1322 iterations)

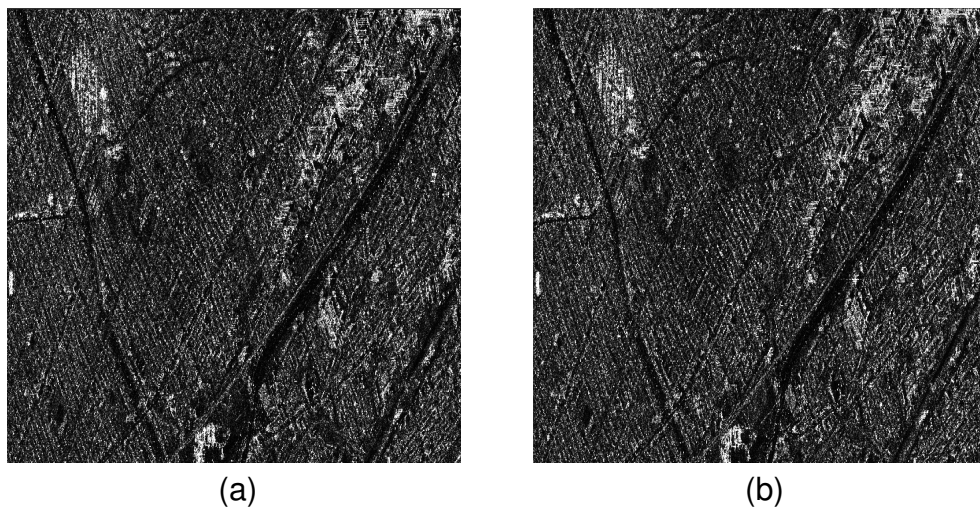


Figure 5.5 : Radarsat-2 images acquired on June 5, 2018 (a) and June 29, 2018 (b), covering part of the city of Montreal (Quebec, Canada)

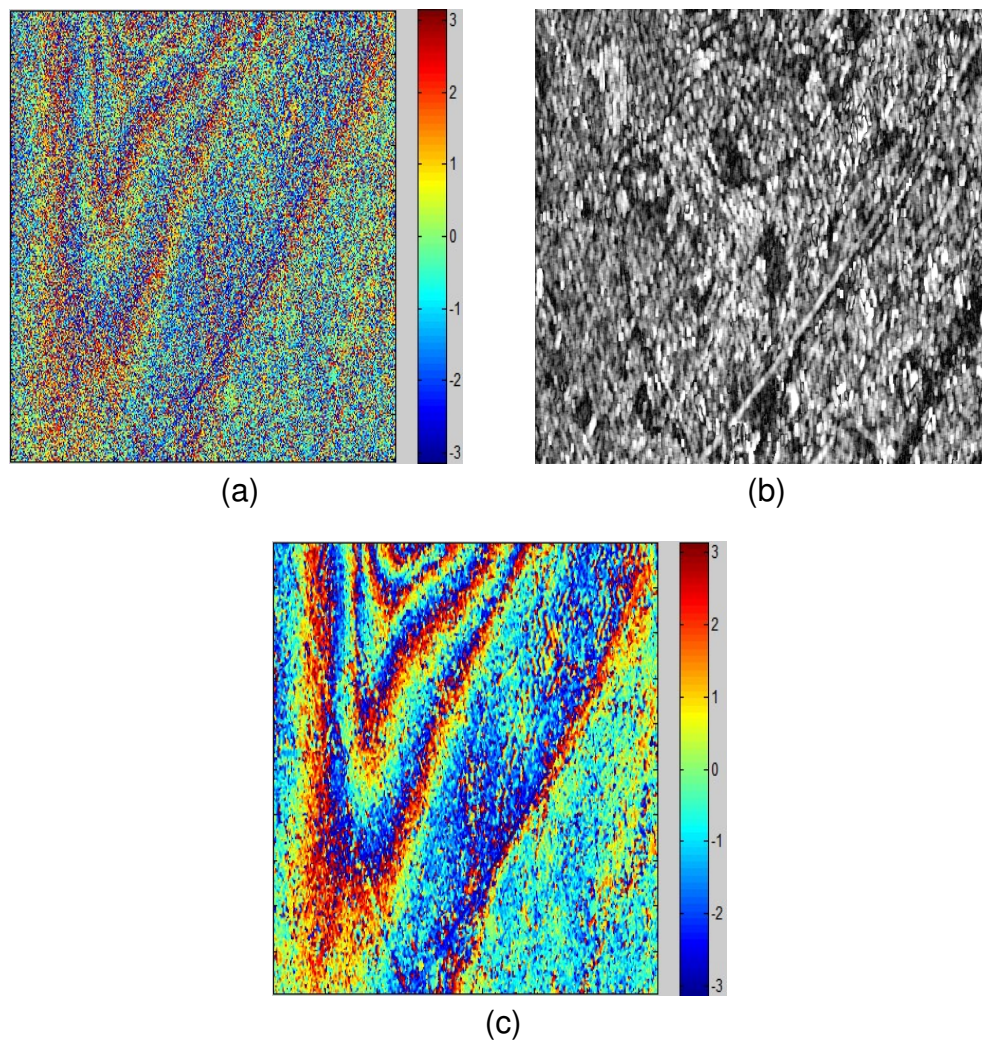


Figure 5.6 : (a) Interferogram generated from the pair of RADARSAT-2 images of Fig. 5.5 ; (b) Corresponding interferometric coherence image ; (c) Filtered interferogram ;

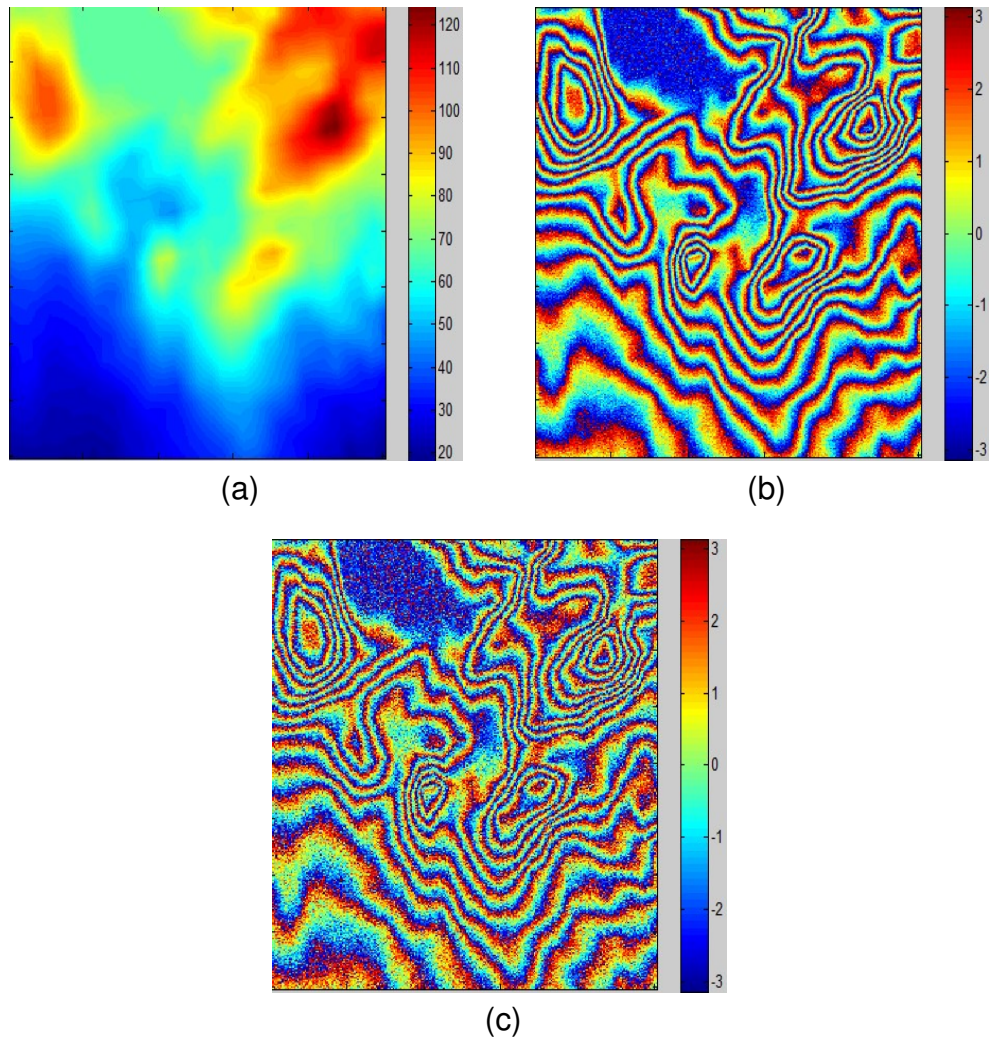


Figure 5.7 : (a) Portion of a Digital Terrain Model (DEM) of the study site ; (b) Interferogram with $\gamma = 0.6$; (c) Interferogram with $\gamma = 0.3$

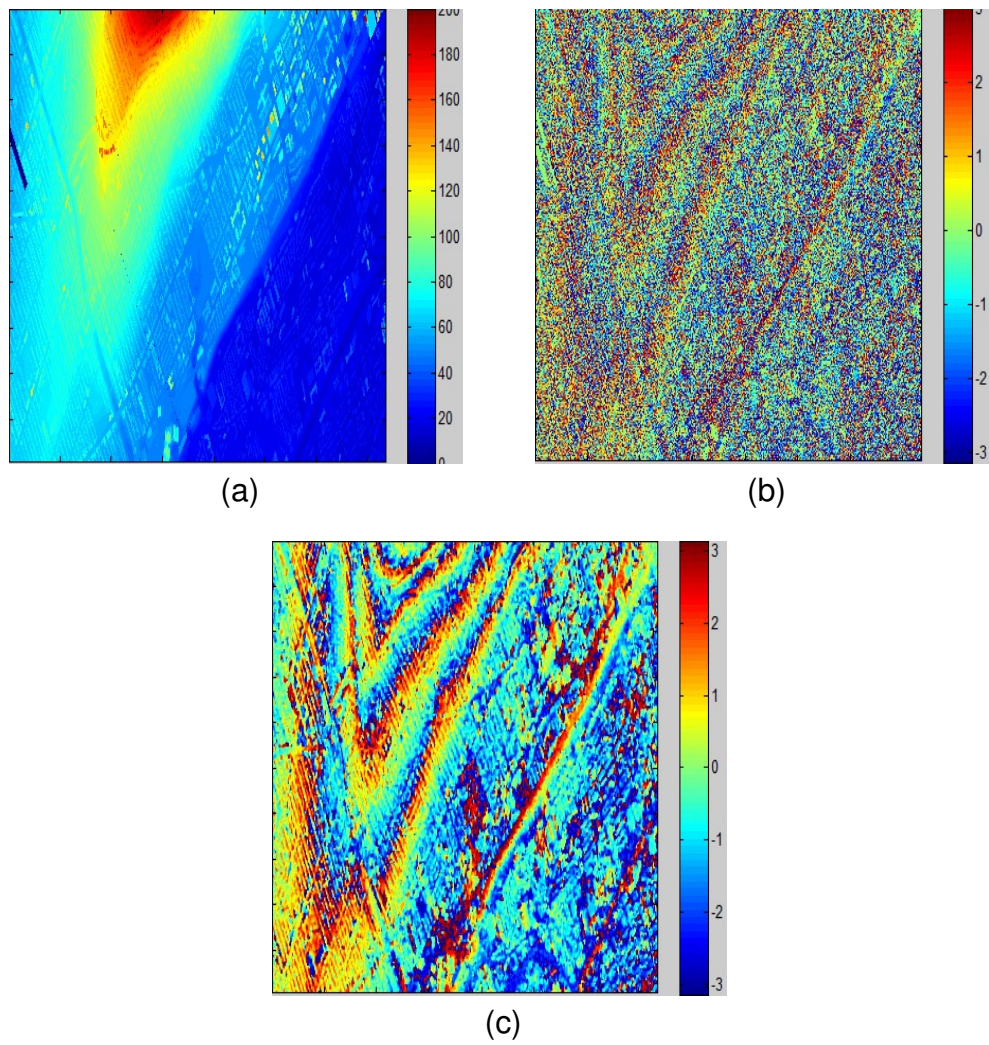


Figure 5.8 : ((a) Portion of a Digital Surface Model (DSM) of the study site ; (b) Simulated interferogram ; (c) after filtering of (b)

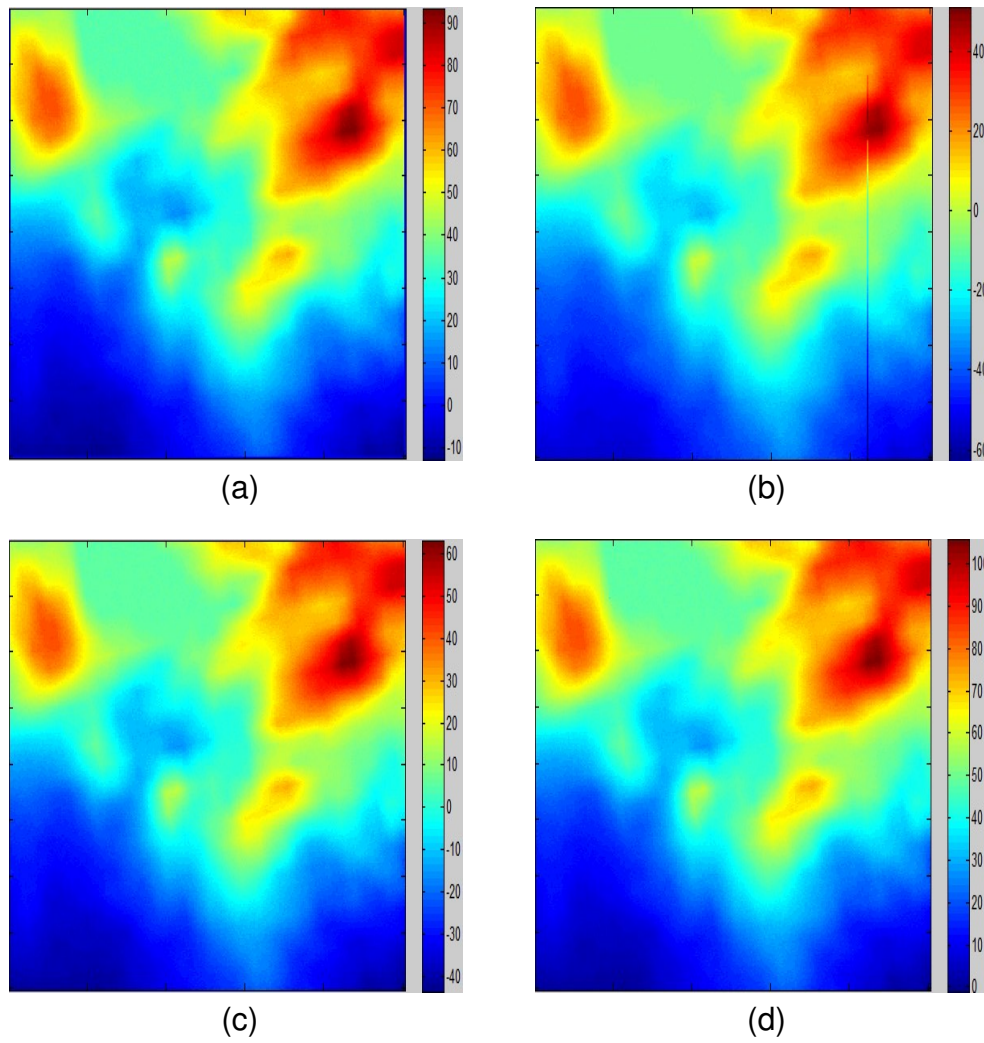


Figure 5.9 : Results of phase unwrapping algorithms applied on the interferogram Fig. 5.7(b) : (a) Branch Cuts (BC), (b) Minimum Cost Flow Networks (MCF), (c) Minimum L^p -norm (LS), and (d) Proposed Algorithm (PA)

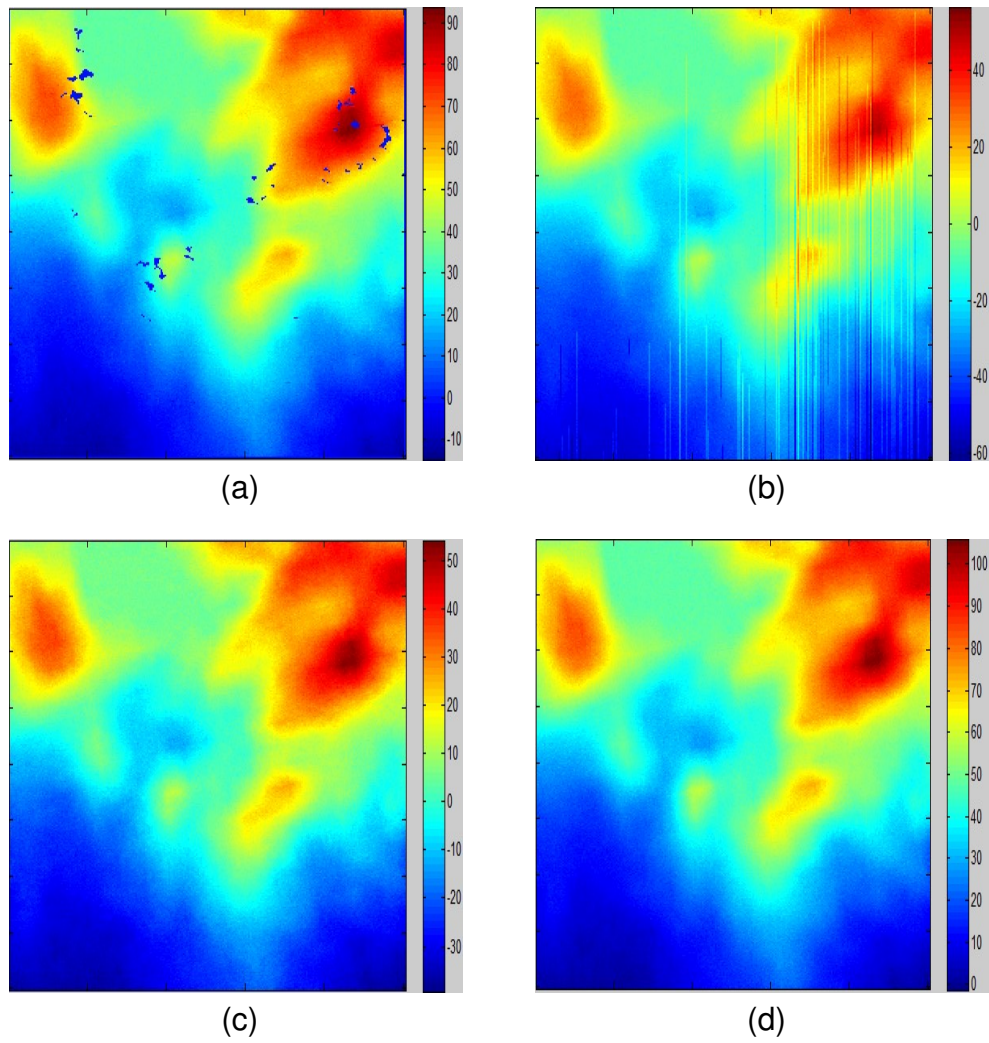


Figure 5.10 : Results of phase unwrapping algorithms applied on the interferogram Fig. 5.7(c) : (a) Branch Cuts (BC), (b) Minimum Cost Flow Networks (MCF), (c) Minimum L^p -norm (LS), and (d) Proposed Algorithm (PA)

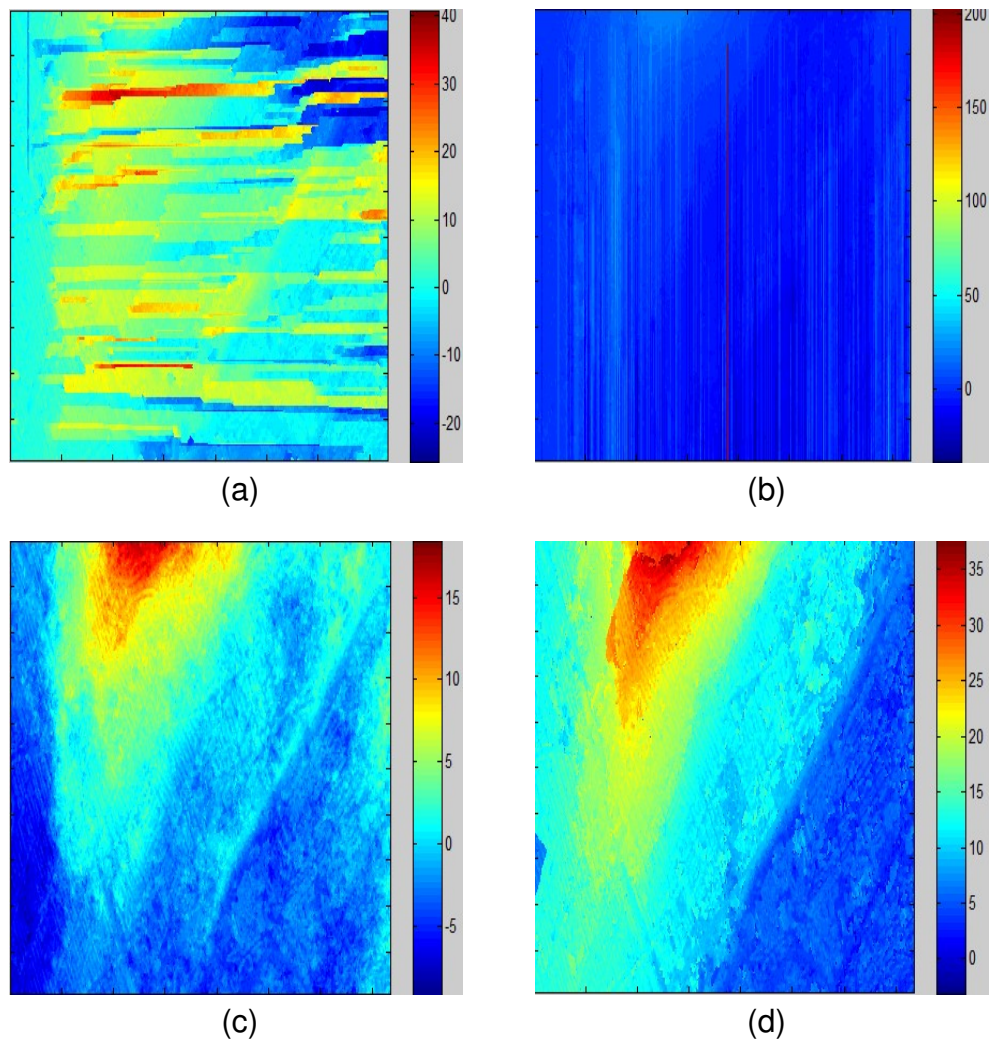


Figure 5.11 : Results of phase unwrapping algorithms applied on the interferogram Fig. 5.8(d) : (a) Branch Cuts (BC), (b) Minimum Cost Flow Networks (MCF), (c) Minimum L^p -norm (LS), and (d) Proposed Algorithm (PA)

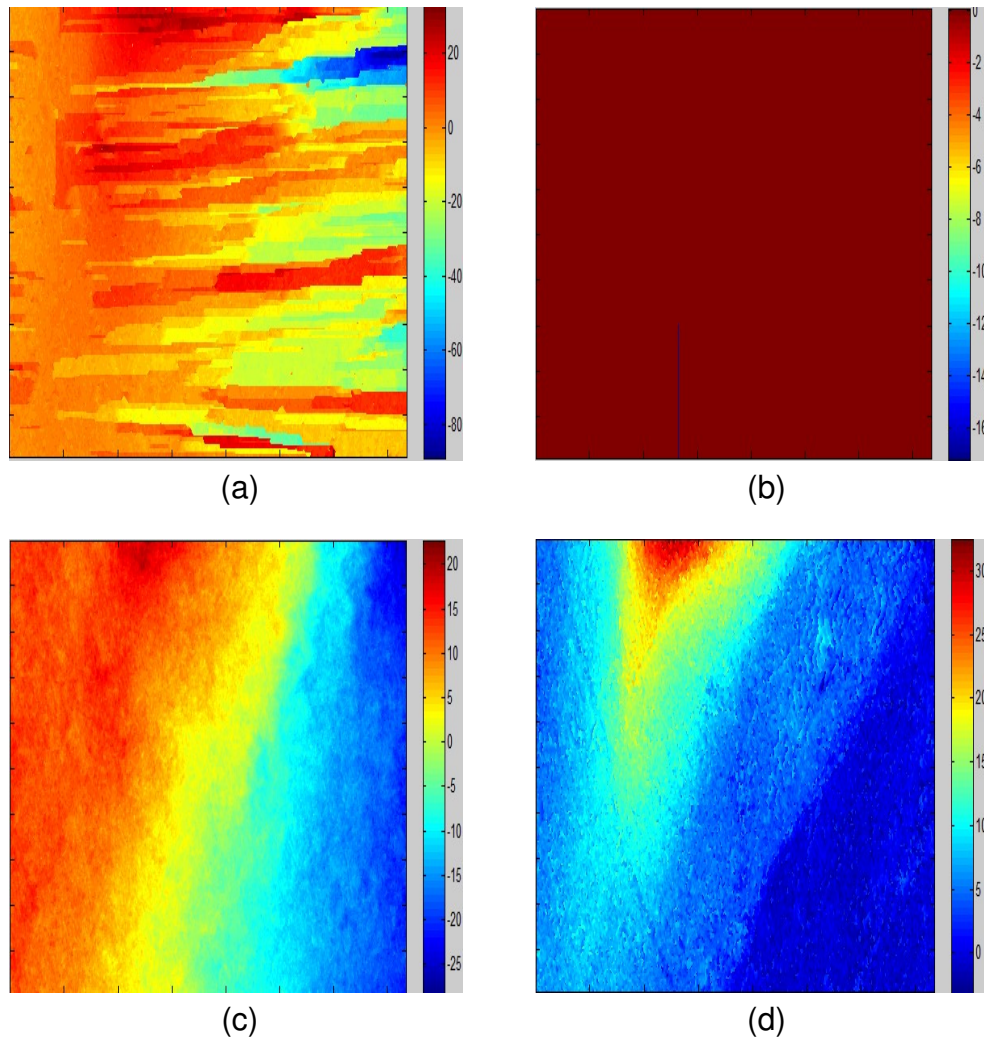


Figure 5.12 : Results of phase unwrapping algorithms applied on the interferogram Fig. 5.6(c) : (a) Branch Cuts (BC), (b) Minimum Cost Flow Networks (MCF), (c) Minimum L^p -norm (LS), and (d) Proposed Algorithm (PA)

CHAPITRE 6

SUR L'APPLICABILITÉ DES NOUVEAUX ALGORITHMES DE FILTRAGE ET DE DÉROULEMENT DE PHASE POUR LA GÉNÉRATION DE MNA ET LA SURVEILLANCE DES DÉFORMATIONS DANS LES ÉCOSYSTÈMES URBAINS

Résumé

L'application de l'interférométrie RSO pour la surveillance des changements de surface et la génération des cartes d'altitude implique la résolution du problème d'ambiguïté de phase. Pour faciliter ce processus complexe, le filtrage de la phase interférométrique est généralement appliqué au préalable pour améliorer la qualité de l'interférogramme d'entrée. Dans cet article, nous évaluons le potentiel de la combinaison des deux nouvelles techniques pour le filtrage et le déroulement de phase. Le filtrage se base sur une nouvelle formulation du filtre adaptatif gaussien anisotrope dans le domaine spatial tandis que le déroulement fait appel à une modélisation contextuelle du champ de phase. La méthodologie proposée fournit des résultats améliorés pour la génération des modèles numériques d'altitudes (MNA) et des taux de déformations comparables par rapport aux méthodes existantes en milieu urbain.

ON THE APPLICABILITY OF NEW INTERFEROMETRIC PHASE FILTERING AND UNWRAPPING ALGORITHMS FOR DEM GENERATION AND DEFORMATION MONITORING OVER URBAN AREAS

*Ayoub Tlili^{1,2}, Gabriela Lianet Siles³, François Cavayas¹,
Samuel Foucher²*

¹Université de Montréal, Montréal, Canada

²Computer Research Institute of Montreal (CRIM),
Montréal, Canada

³Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada

October 8, 2020

Abstract

The aim of this article is to evaluate the potential of a new approach of filtering and unwrapping a SAR interferogram for generating either digital elevation models or maps of Earth's crust movements. Filtering is done by a modified anisotropic Gaussian filter in the spatial domain and unwrapping is based on a contextual modelling of the phase field. The proposed methodology was applied with : 1) ultra-fine mode RADARSAT-2 images of the city of Montreal to generate a DSM and 2) with Sentinel-1 (IW mode) images of the Mexico Valley Basin Area to generate maps of surface movements. In both cases, the proposed approach provides in many regards improved results compared to standard approaches used for interferogram filtering and phase unwrapping.

6.1 Introduction

About half of the world's population lives in big cities or metropolises and tendencies of population growth indicate that this number will increase up to 60% by 2050 [25]. This situation may be accompanied with critical environmental implications on the climate, the hydrology, the air quality and, in general, on the human health. Remote sensing data can contribute to the research on sustainable urbanization and related domains by providing important information about the surface dynamics and physical parameters such as morphology, land cover, temperatures, roughness, humidity and Earth's crust movements useful to model and understand the impact of modifications of urban and non-urban environments.

Among remote sensing technologies, SAR interferometry (InSAR) is a powerful technique that has opened the door to several and unique applications [1, 18, 26]. It can provide information about the morphology and the three-dimensional structure of urban areas and their surrounding natural environments [26]. Its differential and multi-temporal configuration can also help to detect changes on the land surface triggered by natural processes and human activities [1]. Products such as displacement maps and digital elevation models (DEMs) can be produced from the InSAR processing by combining

two (or more) SAR images to form an interferogram. This is a multistage processing including coregistration of the complex SAR images, filtering, phase unwrapping and conversion of interferometric phases to surface elevations or surface displacement. Geometrical effects such as layover and shadowing produced, for instance, by high buildings and nearby mountains can particularly impact the efficiency of phase unwrapping. Furthermore, phase ambiguities due to atmospheric delays, or errors generated throughout the interferometric processing chain can hamper the generation of high quality continuous unwrapped phase maps [30]. Therefore, the development of both filtering methods that reduce the impact of these errors on the estimation of unambiguous phase and the optimization of the unwrapping techniques are required to produce reliable results. Effective filtering methods will reduce the noise while preserving the variation of the phase gradient [16]. On the other hand, the unwrapping method needs to be robust enough to be able to distinguish the real phase jumps from those induced by the noise.

Several methods of interferogram filtering and unwrapping have been developed in the last three decades. Xu and al. [27] present a thorough review of filtering techniques. They are classed in three principal categories : a) local filters ; b) transformed domain filters and c) nonlocal filters (NL). The adaptive Lee filter [15] and its variants in the local category as well as the filter of Goldstein and Werner [12] and its variants in the transformed domain are usually implemented in the available InSAR software as the more efficient techniques for interferogram denoising. Non-local filters such as the NL-InSAR technology [7] is a recent development in filtering and are somewhat in an experimental stage. Concerning the interferogram unwrapping techniques, a review is presented by Yu et al. [29]. Globally two types of unwrapping methods can be considered. The path-following methods generally consist in integrating the wrapped phase pixel by pixel following an integration path that could be defined based on geometrical relations or cost functions [13, 14]. The second type of algorithms are independent of the path followed and are usually based on statistical models to minimize the norm and they search a global optimization of the ill-conditioned system [3, 5, 11].

Despite the large number of proposed methods for phase filtering and unwrapping,

there are still gaps in these methods when applied in urban areas especially with variable topography. This was evident in the experiments of Tlili et al [23, 24] comparing the results of standard filtering and unwrapping techniques with those of their newly developed algorithms for interferogram filtering and unwrapping. In summary, the new filtering technique introduces the parameters of the noise PDF to fix locally the kernel elements of an anisotropic Gaussian adaptative filter while the orientation of the filter is specified by the most frequent gradient of the local fringe pattern. Concerning the unwrapping technique, it tries to solve the local constraints through a contextual modelling that consists in weighting each pixel according to its relationship with its neighbour. The global constraints are represented by a cost function that minimizes the sum of weights attributed to the interferogram.

The objectives of this paper are : i) to extend the applicability of the methods proposed by Tlili et al. [23, 24] to other case studies and satellite SAR imagery ; ii) to evaluate the performance of the combined filtering and unwrapping methods by comparing the results obtained to those from the widely used Goldstein filter [13] followed by the SNA-PHU [3] algorithm.

The article is organized as follows. Section 6.2 presents the sites and the data used in this study. In section 6.3 the methodology proposed as well as traditional filtering and unwrapping methods used for the sake of comparison are briefly described. Results and discussion are addressed in section 6.4 and section 6.5 concludes this article.

6.2 Study sites and data

An area located in the Montreal Island (Quebec, Canada) including the Mont-Royal Mountain is chosen as the site for testing the DEM generation by the proposed filtering and unwrapping methods. This area offers a diverse urban landscape (Fig. 6.1 (b)) [8]. In fact, the heart of the mountain, forms a valley surrounded by the peaks of the three hills covered mainly by trees. To the south, we found downtown Montreal with tall buildings. The eastern side is the most homogeneous area in terms of topography and

spatial organization. The northeast side is characterized by a concentration of parks and public buildings. The northwest side is dominated by large commercial and industrial structures.

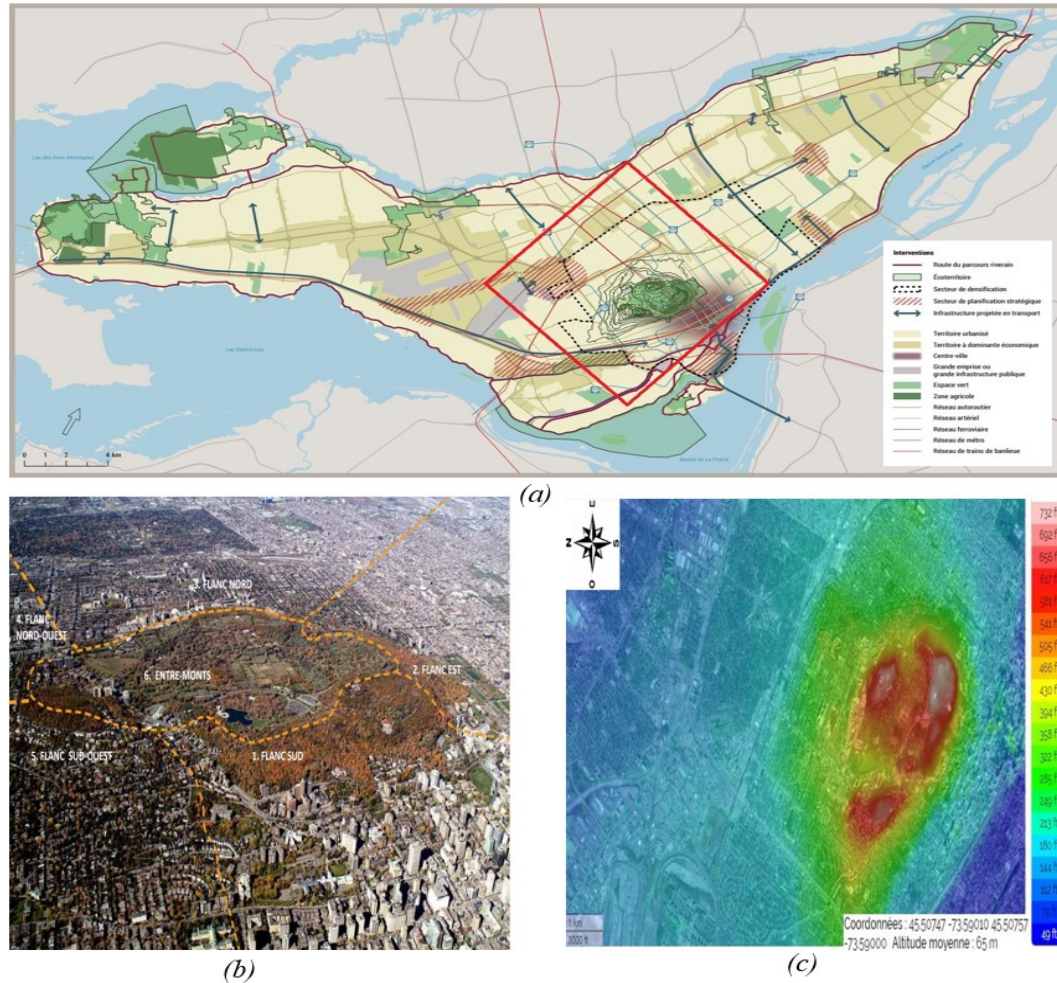


Figure 6.1 : a) Spatial organization concept of the Montreal agglomeration [6] (the study site is bounded by the red rectangle), b) The Mount Royal area and surrounding sites [8], c) A digital elevation model superimposed on an aerial image of the study area

Two RADARSAT-2 images covering this area were acquired on June 5, 2018 (Figure 6.2a) and June 29, 2018 (Figure 6.2b) in ultra-fine mode (HH polarization). The spatial resolution of about 3.5 metres is suitable for urban DSM generation. The baseline, estimated at 300 metres, was appropriate to maintain the coherence while reducing the

ambiguity height. The incidence angle of 23° is somewhat problematic in urban areas, as it exacerbates the layover problem of high-rise buildings and thus phase jumps. On the other hand, phase discontinuities due to shadows are minimized and the phase differences become more sensitive to changes in topography [2]. To validate the results of the unwrapping and filtering methods, a Lidar digital surface model (DSM) (Fig. 6.2c) over the same region is used. The DSM was downloaded from the City of Montreal's website and was acquired in April 2018 with a resolution of 1 metre. The LiDAR DSM was reprojected and resampled into the same grid as for RADARSAT-2 images.

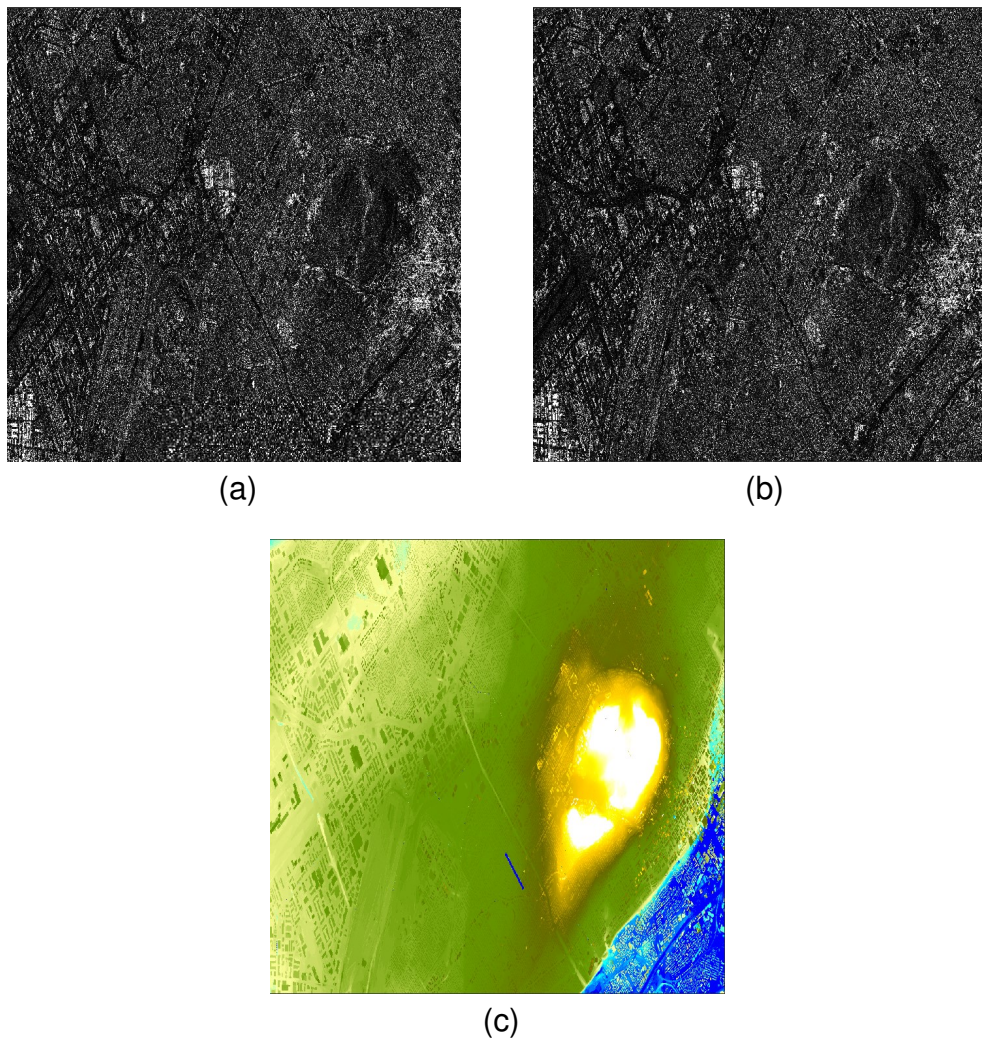


Figure 6.2 : (a) and (b) interferometric pair of RADARSAT-2 intensity images (see text); (c) DSM Lidar

The Mexico Valley Basin (Fig. 6.3) was chosen as the site for testing the applicability of our filtering and unwrapping methods in the case of DInSAR. This area was selected because of its well-known and documented subsidence problems. The Basin is the main aquifer of Mexico City (about 500 to 1000 m below Mexico City). Due to the growth of the population and the increase in water demand, this aquifer was heavily exploited, resulting in a drop in the level of the groundwater, accompanied by the subsidence of the surface. This had serious consequences for Mexico City having one of the highest subsidence rates which can reach as high as 40 cm/year in some parts of the city [17].

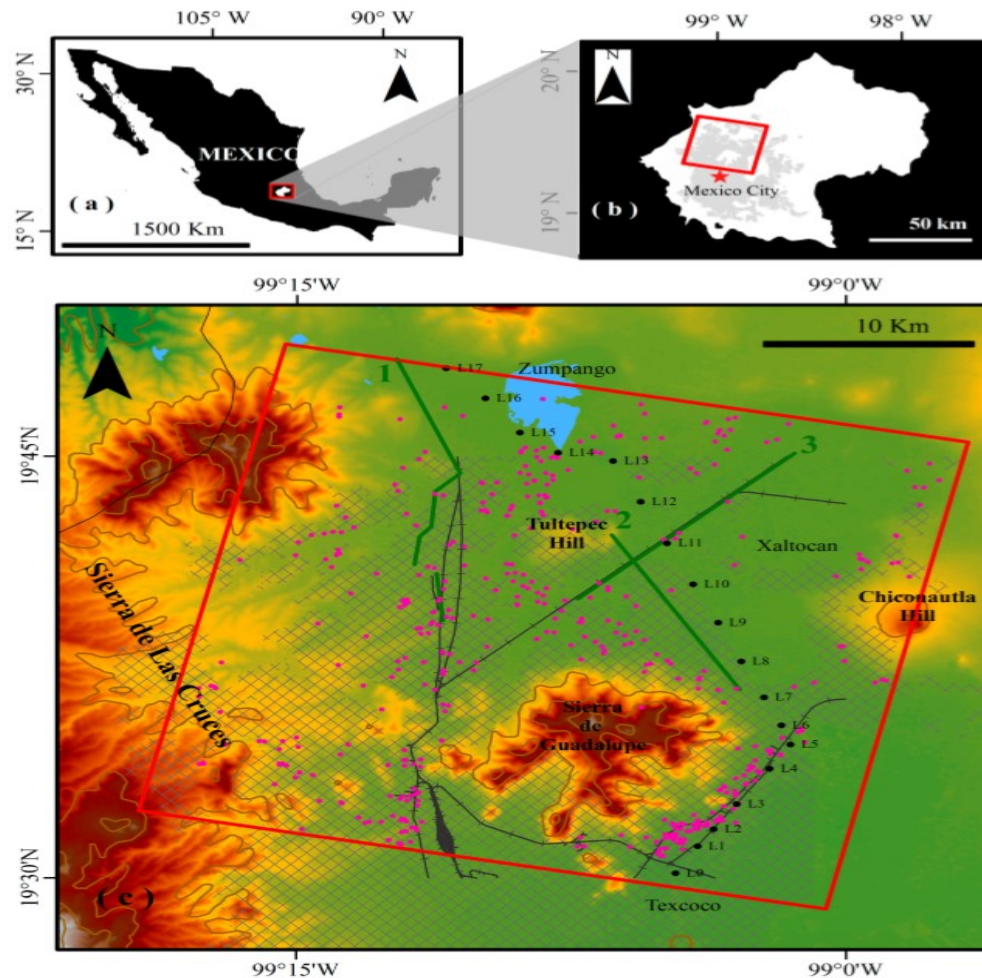


Figure 6.3 : (a) Location of the Mexico City Basin (b) Studied area (red square) (c) Physiography of the site [20], the main characteristics of the study area are represented : mountain range, hills and ancient lakes (Texcoco, Xaltocan and Zumpango).

For the deformation application, SAR data from satellite Sentinel-1 were used. Sentinel data products are freely accessible in various modes (StripMap SM, interferometric wide swath IW, Extra Wide Swath EW), single or dual polarizations and resolutions (full, high, and medium). In this study, two Sentinel-1 wide swath (IW) single complex look (SLC) products (5 m by 20 m spatial resolution) were acquired over the studied site on November 8, 2014, and December 2, 2014, in HH polarization (Fig. 6.4). For this application, the topographic variations are not very important, so a small baseline of 10.25 m is used. It is expected that geometric and possible atmospheric errors will be reduced (even neglected) with such a baseline. To reduce phase discontinuity errors, a mean incidence angle of 44° was chosen.

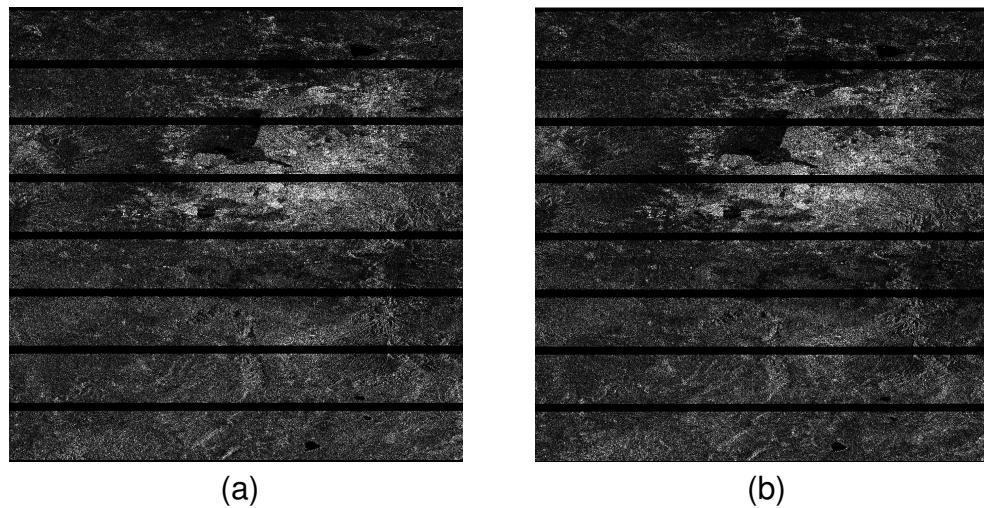


Figure 6.4 : Burst Sentinel-1 intensity images acquired on a) November 8, 2014; b) December 2, 2014

6.3 Methodology

In this section, the processing steps of SAR images used to generate the deformation map of the Mexico City Basin and the DEM of the Montreal Island are presented respectively in sections 6.3.1 and 6.3.2. The proposed algorithms for filtering [24] and phase unwrapping [23] are summarized in Section 6.3.3. In addition, the standard Goldstein filtering [13] and unwrapping SNAPHU [3] algorithms used as reference methods

for the sake of comparison with the proposed methods are briefly described in Section 6.3.4.

6.3.1 Sentinel-1 deformation map

Figure 6.5 shows the flowchart of the interferometric processing performed by exploiting the SNAP toolbox from the European Space Agency (ESA). Most of the processing of the Sentinel-1 data is carried out at the burst level. The coregistration, filtering and interferogram formation are performed at this level. An external DEM (SRTM of 30 m resolution) as well as precise orbit information provided by ESA are used to carry out the coarse coregistration procedure. A fine coregistration is then performed to improve the estimation of the remaining shifts in azimuth and range. Filtering is applied to the coregistered images to reduce the noise produced by the non-overlapping part of the spectrum of the master and slave. However, according to [28], spectral range filtering at this point of the processing chain might not be necessary due to the large range bandwidth. Afterwards, the complex interferogram is generated and the individual bursts are concatenated into a single deburst sub-swath. The deburst sub-swath interferogram is then topographically corrected by using the same DEM employed in the coregistration step. Additionally, the Goldstein [13] or the proposed adaptive filter [24] was used to enhance the signal-to-noise ratio (SNR), which can improve the results from the unwrapping procedure. Finally, the unambiguous phase of the sub-swath filtered differential interferogram is estimated by using SNAPHU [3] or our unwrapping algorithm [23]. Both the proposed filtering and unwrapping algorithms are coded in Java and implemented as plugin into the SNAP toolbox. Some details about the filtering and the unwrapping algorithms are provided in section 6.3.3. The standard Goldstein's filter [13] and SNAPHU [3] methods were already used in other studies on Mexico soil deformation providing reliable results [17, 20, 22]. Therefore, the results of the new filtering and unwrapping methods are evaluated in comparison to those obtained from the application of the Goldstein filter and the SNAPHU algorithm. Moreover, results from existing studies over the area are also used to evaluate the proposed methodology and two quality indicators estimated to support the comparison.

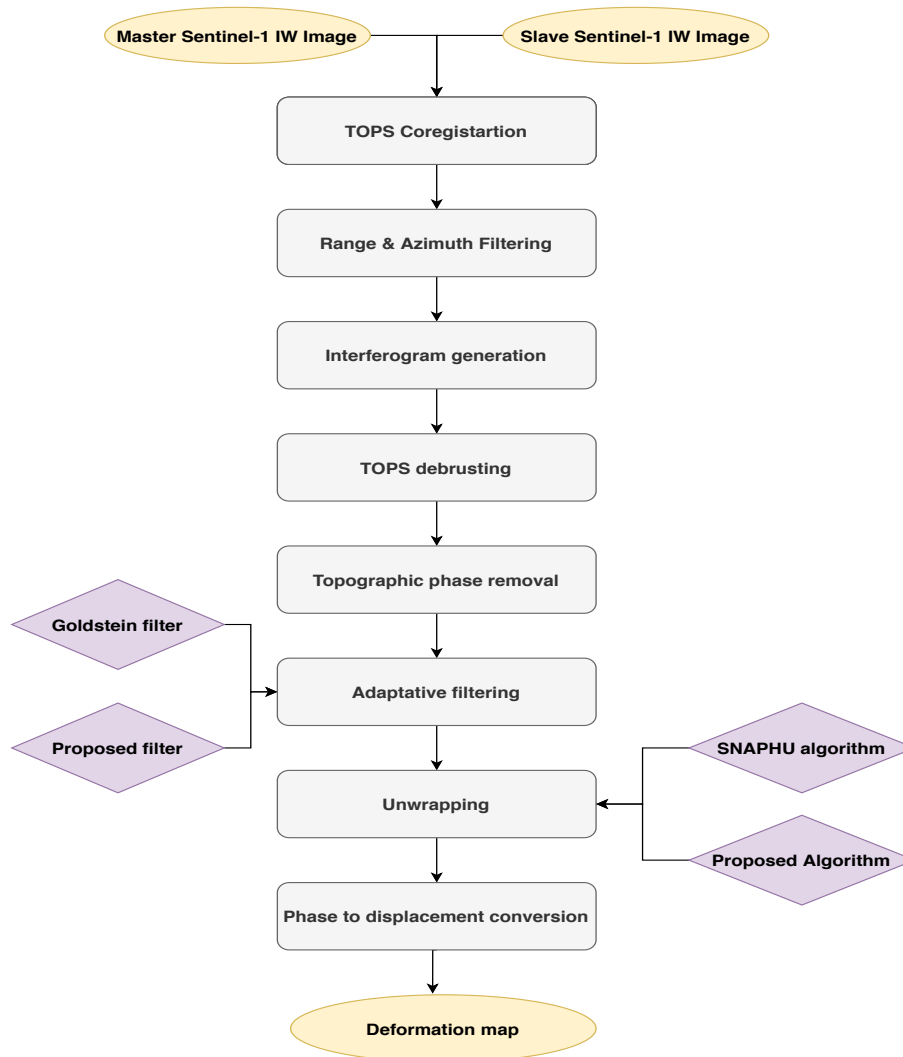


Figure 6.5 : Flowchart of the methodology applied for the generation of displacement maps by exploiting Sentinel-1 images

6.3.1.1 RADARSAT-2 DEM generation

The DEM over the region of Montreal was generated using, as previously, the SNAP software. Fig. 6.6 shows the flowchart of the interferometric processing applied for the generation of a DEM by exploiting the RADARSAT-2 images. The appropriate SNAP operators are used for image coregistration, range and azimuth filtering and interferogram generation. To preserve local details on the interferogram, we did not use the multilook treatment. Both the Goldstein [13] and our filtering algorithms were used to filter

the interferogram. Then, the phase unwrapping step is done by the SNAPHU [3] and our algorithm. Finally, the unwrapped phase is converted to a height using the SNAP operator. As mentioned in section 6.2.2, an external LiDAR DSM of the region of interest is used to evaluate the combined performance of the proposed filtering and unwrapping algorithms.

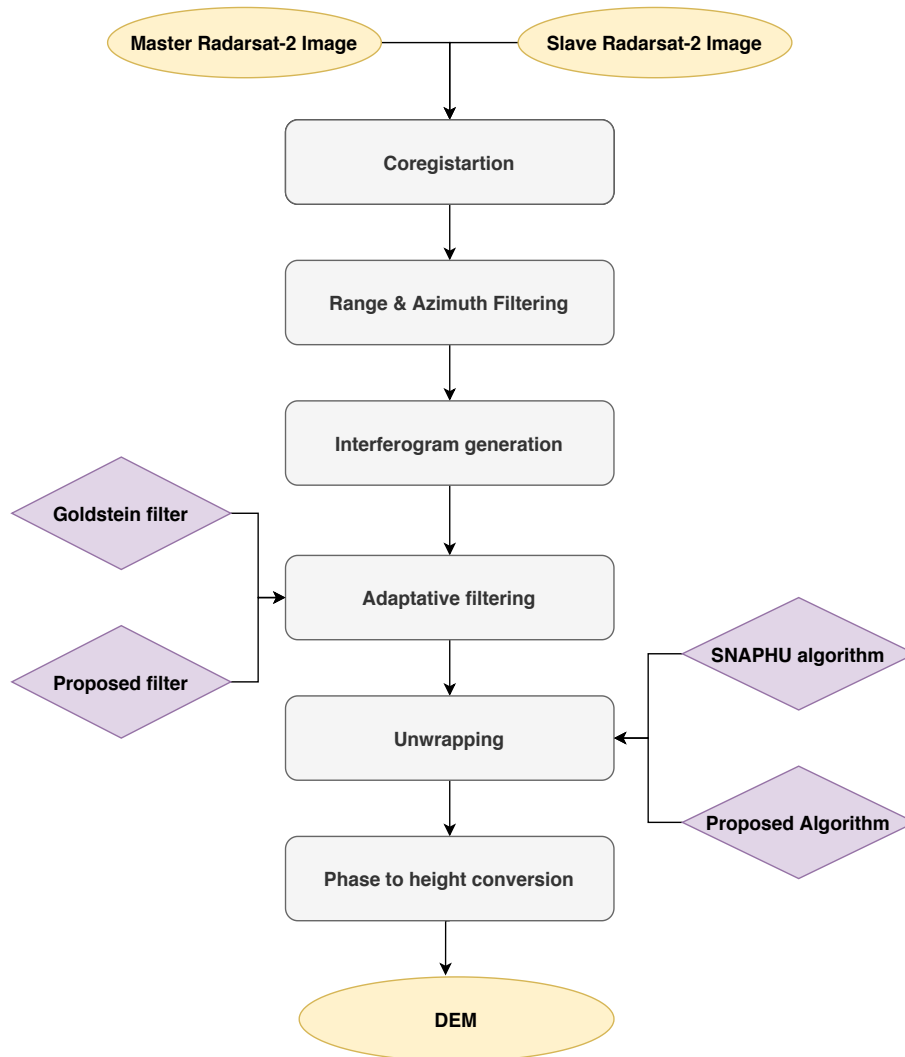


Figure 6.6 : Flowchart of the methodology applied for the generation of DEM by exploiting RADARSAT-2 images

6.3.2 Proposed algorithms

6.3.2.1 Filtering

The phase filtering method developed by [24] is a new formulation of the Gaussian Anisotropic filter defined as :

$$F_{\theta}(x_{\theta}, y_{\theta}, \sigma_x, \sigma_y, \theta) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\frac{x_{\theta}^2}{2\sigma_x^2}\right\} * \exp\left\{-\frac{y_{\theta}^2}{2\sigma_y^2}\right\} \quad (6.1)$$

where '*' represents convolution. The 2-D convolution can be obtained by convolving first with a 1-D Gaussian in the x-direction, then with another 1-D Gaussian in the y-direction. θ is the orientation angle, where x_{θ} -axis is directed in θ direction, whereas y_{θ} -axis is orthogonal to θ , and

$$\begin{bmatrix} x_{\theta} \\ y_{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

The orientation angle is calculated based on the most frequent gradient orientation in the neighbouring of a pixel. An orientation histogram is formed, and the maximum peak of the histogram is considered as the direction of the gradient. The θ is determined as orthogonal to the direction of the gradient.

The standard deviations σ_x and σ_y represent the scaling parameters in respectively the x_{θ} and y_{θ} axis. The level of filtering must be in accordance with the noise level in the interferogram. Thus, $\sigma_x = \sigma$, Where σ is the standard deviation of the phase noise according to the probability density function of the phase noise given by [15]. While, σ_y depend to noise level and local image texture. The value of σ_y is computed as :

$$\sigma_y = \sigma \beta^n \quad (6.3)$$

β_n is calculated to provide the local statistical characteristics [24].

6.3.2.2 Unwrapping algorithm

The proposed unwrapping algorithm consists in minimizing the number of phases jumps by using the Genetic algorithm in a contextual modelling that compares every pixel with its nearest neighbour. The weight attributed to each pixel is a function of a regularity index, which is estimated from the number of phase jumps and the phase gradient within a given sliding window. Figure 6.7 summarizes the proposed method.

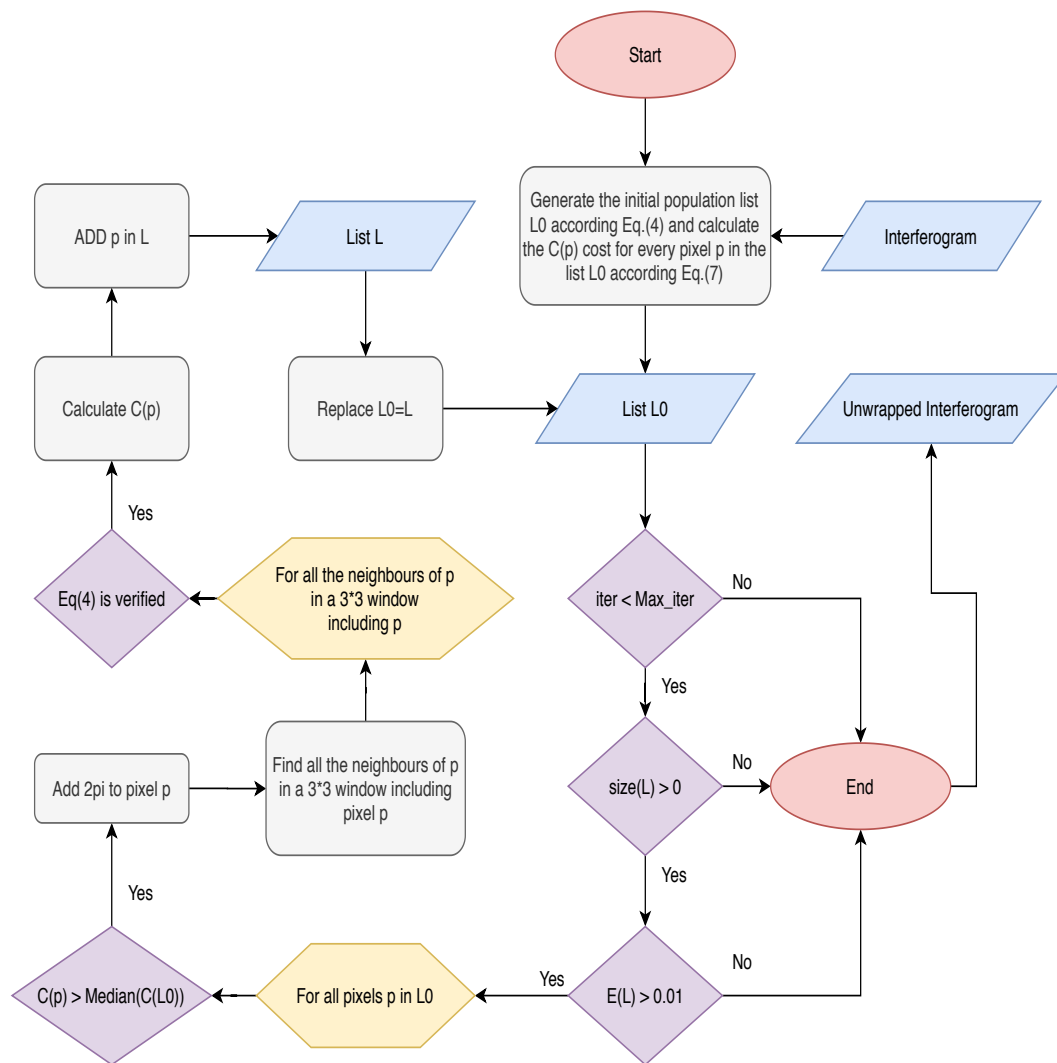


Figure 6.7 : Flowchart of the phase unwrapping algorithm [23]

In order to estimate the regularity index, a new quality measure C is developed in

[23].

$$C(p) = v_{n=1}(p) \times v_{n>1}(p) \times G(p) \quad (6.4)$$

$C(p)$ is used to evaluate the goodness of each pixel in the interferogram. It is based on two parameters including the phase jump ratios $v_n(p)$ and phase gradient $G(p)$. The first parameter is the ratio between the number of pixels that present a phase jump with the central pixel p and the total number of pixels within a sliding window size $(2n+1)(2n+1)$. This parameter is used to differentiate between phase jumps caused by local variations such as building heights or data gaps, and phase jumps caused by topography. The second parameter $G(p)$ calculates the magnitude of the gradient of the pixel p according to the boxcar gradient operator in four directions : horizontal, vertical, diagonal directions of 45 degrees and of 135 degrees. This parameter is used to detect fringe boundaries and ignore areas where interferometric coherence is low.

An objective function is afterwards employed to minimize the sum of weights $f(x)$ of all the pixels in the interferogram

$$\mathbf{x}_{opt} = \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}); f(\mathbf{x}) = \sum C(p) \quad (6.5)$$

x is the configuration of phase jumps in an interferogram for a given iteration. The optimization is similar to the region growing, selecting seeds according to Eq. 6.4 and driving the region growing gradually according to the priority value of Eq. 6.4 updated iteratively. The movement consists in adding 2π to the selected pixels. Every movement update each neighbour pixel that has been corrected in a 3×3 window. The algorithm gradually converges by scanning the entire image in a similar manner to the region growing algorithms. The method is iterative and stops when the acceptance rate becomes very low. This percentage is defined as the ratio between the sum of the weights of the interferogram analyzed in the current iteration and the total number of iterations. To improve the processing time of the Genetic algorithm, all the selected pixels are organized in a vector of weights but keeping track of these pixels in the interferogram.

6.3.3 Reference algorithms

6.3.3.1 Goldstein filter

The method of Goldstein and Werner [13] consists in a low-pass filter that adapts to the phase variation, strongly smoothing regions with high decorrelation. Because of its capability to mitigate noise effects, it has been widely used in a number of applications; however, one main limitation of the method resides on its inability to preserve edges between interferogram fringes and therefore might not work very well in regions of high phase gradient [10]. Several studies have focused on the improvement of the original filter [10, 21]. In the present study, the original Goldstein's filter is used as the reference method because, as previously stated, it has already shown to yield to satisfactory results over the Mexico region [17, 20].

6.3.3.2 SNAPHU algorithm

The SNAPHU algorithm, standing for Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping, is a public and widely used unwrapping tool developed by [3]. This algorithm has been demonstrated to effectively unwrap the interferometric phase in multiple applications [9, 22]. SNAPHU relies on the maximum a posteriori probability (MAP) for the estimation of the absolute phase. The problem involves the definition and estimation of non-linear cost functions through non-linear network-flow approaches, exploiting observable SAR and InSAR inputs (wrapped phase, the coherence and the intensity). These functions depend on local values of the given inputs and their shape varies through the interferogram [3]. The cost functions were designed for two particular applications (i.e., DEM generation and deformation map). The derivation of cost functions for these two cases implies to first separate the unwrapped-gradient PDFs into their signal (topography, deformation) and noise components, the latter being considered as normally distributed and calculated from the observed coherence. For topographic applications, the dependence of the radar image brightness on the surface slope (i.e., intensity) is modelled as a function of topography. On the other hand, the deformation component is considered independent of the intensity, but dependant of the correlation between the

master and slave images. Additionally, in order to overcome the constraints due to computational capabilities in the case of large interferograms [4] extend the method by using statistical models on smaller unwrapped regions (tiles), which are supposed to have no relative unwrapping errors. The final product is generated by assembling the reliable regions into a full unwrapped interferogram, being the phase offsets between the regions computed from the maximization of the posterior probability of the final solution. This way, the MAP estimation approach of the first version of SNAPHU is extended to cover a secondary optimization problem of tile reassembly in large interferograms. Although SNAPHU has a great flexibility and customizability, the statistical modelling of the cost functions may not always be the optimal choice, because of the arbitrary distribution of phase jumps in an interferogram. In the present study, the improved version of SNAPHU 2.0.0, release on March 2019 was used.

6.4 Results and discussions

6.4.1 Sentinel-1 deformation map

Figure 6.8 compares the displacement map calculated after application of the Goldstein filter and the SNAPHU algorithm (Figure 6.8b) to the one obtained from the proposed filter and unwrapping algorithm (Figure 6.8a). The average velocity estimated by both methods is around 0.035 m/month which approximately coincides with the values reported in the literature [17, 19, 20]. However, both methods seem to overestimate the results on areas known to experience important subsidence rates [e.g., [1, 17, 19, 20, 22]] (Table 6.I). For instance, in the airport surrounding areas this rate is estimated as 0.04 m/month by our method (Fig. 6.8) vs 0.04-0.05 m/month by the Goldstein-SNAPHU method. Values over these areas from the literature vary between 0.02-0.03 m/month. Another area of important deformation rate is located in Ecatepec de Morelos. Previous studies (e.g., [17, 19, 20]) suggest values ranging from 0.02 m/month to 0.03 m/month. These values are comparable to those inferred from the proposed and the reference method (Goldstein-SNAPHU) as noted in Table 6.I. One of the regions experiencing the highest land sinking rates corresponds to the area of Nezahualcóyotl, near the subway

line, with values measured by some studies larger than 0.03 m/month [e.g., [1, 28]]. In this study, deformation rates of 0.04 m/ month were found in this area (Table 6.I).

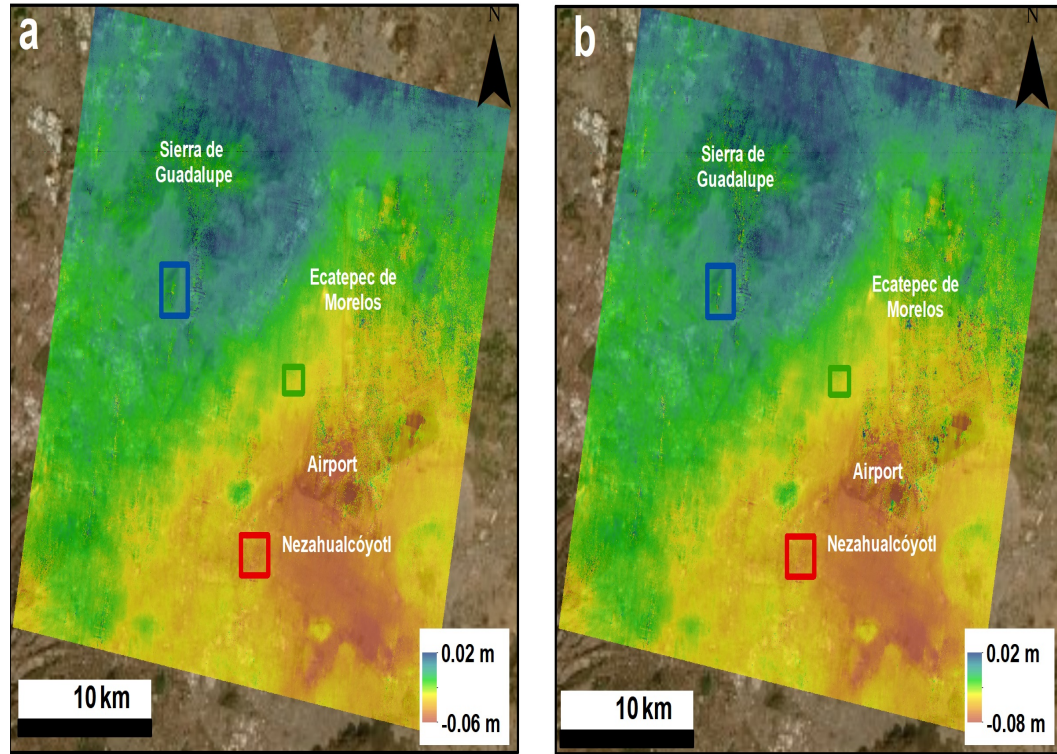


Figure 6.8 : Displacement maps generated from a) the proposed Anisotropic Gaussian Filter and phase unwrapping algorithm b) the Goldstein filter and the SNAPHU unwrapping algorithms. The rectangles indicate examples in different areas where displacements are compared to existing studies : red rectangle : Near the Subway line in Nezahualcóyotl (lacustrine zone); green rectangle : in Ecatepec de Morelos, near the airport (lacustrine zone); blue rectangle : hilly area near Sierra de Guadalupe. The results are overlaid on a World Imagery

The differences between the present study and the literature could be explained by the different periods of analysis, data type and resolution as well as the different methods and parameters used in the interferometric processing chain. The positive displacement in both cases mainly occurs in the mountainous areas such as for example near Sierra de Guadalupe which was also observed in other studies [e.g., [19, 20]]. Similar “uplift” values have been found in these areas from both methods and overestimation of subsidence values are, in general, slightly larger in the Goldstein-SNAPHU based map (Fig. 6.8b).

Tableau 6.I : Comparison over areas of important subsidence rates (m/month) measured by the current method, the reference method (Goldstein-SNAPHU) and derived from the literature

Site (see Fig. 6.6)	Our method [m/month]	Goldstein-SNAPHU [m/month]	Literature [2, 25, 26, 29, 33] [m/month]
Airport	0.04	0.04-0.05	0.02-0.03
Ecatepec de Morelos	0.03	0.03	0.02-0.03
Near Subway line in Neza-hualcóyotl	0.04	0.04	0.02-0.03

Fig. 6.9 illustrates the difference between the displacement obtained by the combined Goldstein-SNAPHU method and the proposed filter-phase unwrapping method. In general, the results over the entire area are similar. Larger differences (0.025 m) are observed to occur over the mountainous areas and in areas characterized by large deformation gradients (e.g., near the airport). Table 6.II shows the results of the two MSE and the SSIM quality indicators used to further compare the displacement maps shown in Fig. 6.6. The Goldstein-Snaphu derived map was selected as the reference image. The small values observed for both indicators suggest a good correspondence of the maps produced by different filtering and unwrapping algorithms. Overall, the comparisons of results from the current methodology with the reference approach as with the literature as well as the quality indicators suggest its potential for deformation studies.

Tableau 6.II : Mean Squared Error (MSE) and the Structural Similarity Index (SSIM) are used to compared the produced displacement (DSP) maps in Fig. 6.5.

	<i>MSE</i>	<i>SSIM</i>
<i>DSPmaps</i>	4.1×10^{-07}	0.996

6.4.2 InSAR based DEM

Figure 6.10 shows the results of the interferometric processing of the RADARSAT-2 image pair using the two approaches. The generated DSMs as well as the reference DSMs are shown in Fig. 6.10. DSM_{PM} (Fig. 6.10e) and DSM_{SM} (Fig. 6.10f) are the digital surface models that are the results of interferometric processing using the pro-

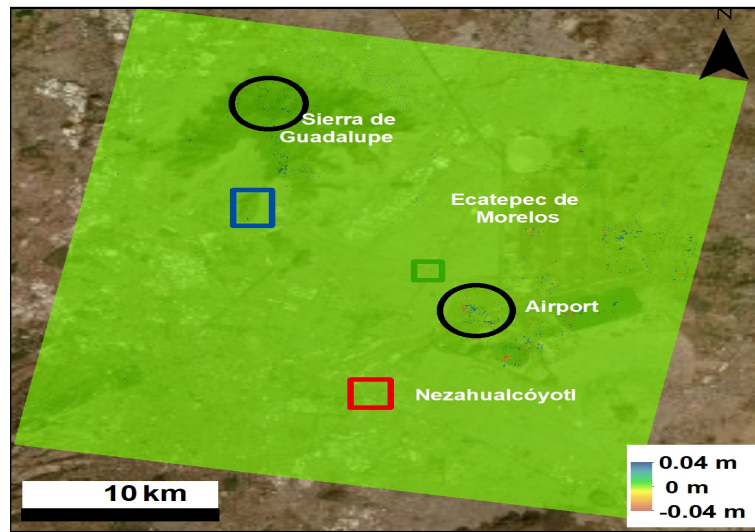


Figure 6.9 : Difference in displacement between the proposed filtering and unwrapping methods and the standard Goldstein-SNAPHU methods overlaid on a World Imagery. The red and blue rectangles represent the areas analyzed in Fig. 6.6. The black dots indicate regions of important differences between these methods.

posed and standard methods respectively. These DSMs were compared to the DSM Li-dar (DSM_{Lidar}) (Fig. 6.10c) and a DEM from the shuttle's radar topography mission (DEM_{SRTM} 3Sec) (Fig. 6.10d). The mean square error (MSE) is used to compare the results of these methods (Table 6.III).

Tableau 6.III : Mean Squared Error (MSE).

	DEM_{PM}	DEM_{SM}
DSM_{Lidar}	14.6	17.2
DEM_{SRTM}	12.4	14.6

According to the MSE results presented in Table 6.III, the proposed methods compared to a DSM (LiDAR) and a DEM (SRTM) have the advantage over standard methods. Visually, this advantage is verified. Indeed, the areas surrounded by circles on the four DEMs in Fig. 6.10 represent industrial zones, on these areas the proposed methods make it possible to identify and preserve the structure of large buildings, unlike the standard methods and even the DEM of the SRTM mission. This is explained by the fact that Goldstein filter tends to over smooth the interferogram and thus to lose local informa-

tion about building structures. In the case of the SRTM DEM, the coarse resolution is the main factor for the loss of local details in the interferogram. In addition, in downtown Montreal, where there is a high urban density with high buildings (rectangle) standard methods have difficulty to maintain the overall structure of the topography of this area. Phase jumps caused by high buildings will cause the error of the SNAPHU algorithm, unlike the proposed phase unwrapping method which is able to identify and ignore these phase jumps. The area delineated by a diamond in Fig. 6.8 represents significant topographic variations due to Mont-Royal Mountain. In these areas, we can still see the advantage of the proposed methods over the standard methods. This advantage is explained by the ability of the proposed methods to clearly identify the fringe patterns on the interferogram despite the presence of interferometric noise due to a loss of interferometric coherence in this region (Fig. 6.10b).

In general, the algorithms proposed by Tlili et al. [23, 24] have demonstrated their effectiveness in maintaining the topographic structure, despite the presence of dense urban structures and interferometric noise. The filtering algorithm can smooth the interferogram without altering local details. Again, the phase unwrapping algorithm can differentiate phase jumps caused by interferometric noise from those caused by topographical variations and avoid the problem of error propagation. However, the results of these algorithms depend on the size of the filter algorithm's smoothing windows and the size of the window used to measure the quality parameter of the phase unwrapping algorithm. In the case of the filtering algorithm, the size of the window depends on the variation of the noise in the interferogram. This mobile window improves the filtering results, but sometimes only the variance of the interferometric noise is not sufficient to determine the size of this window. For the phase unwrapping algorithm, the size of the window used to calculate the quality parameter is fixed, although the size of this window depends on the size of the interferogram fringes.

6.5 Conclusion

This work aims to extend the applicability of the unwrapping and filtering methods presented in [23, 24]. The new applications include the generation of deformation maps and DEM using Sentinel-1 and RADARSAT-2 data, respectively. In the case of deformation, the assessment of the algorithm through the comparison with a deformation map generated from well-known unwrapping and filtering algorithms and with measured values of deformations from previous studies, indicate a good performance of the proposed algorithms. Likewise, in the case of the DEM generation, the comparison with a high-resolution DEM demonstrates the capability of the proposed filtering-unwrapping methodology. The evaluation through the MSE and SSIM indicators confirms the potential of these new algorithms for these types of InSAR applications. Nevertheless, we emphasize that the quality of the results provided by the proposed algorithms can be influenced by the size of the smoothing window used in the filtering algorithm and of the window used in the estimation of the quality measure exploited in the phase unwrapping algorithm. A moving window that depends on both the variance of the interferometric noise and the gradient direction can improve the results of the filtering algorithm. Equally, the phase unwrapping algorithm can profit from a moving window dependant on the variation of the topography/deformation for improving the estimated quality parameter, and therefore enhance the results.

Acknowledgement

This project was financed by Canadian Space Agency (SOAR program), NSERC and the Ministère de l'Économie et de l'Innovation (MEI) of the province of Québec.

Bibliographie

- [1] Enrique Cabral-Cano, Timothy H Dixon, Fernando Miralles-Wilhelm, Oscar Díaz-Molina, Osvaldo Sánchez-Zamora et Richard E Carande. Space geodetic imaging

- of rapid ground subsidence in mexico city. *Geological Society of America Bulletin*, 120(11-12):1556–1566, 2008.
- [2] Olivier Cavalié. *Mesures InSAR et modélisation de faibles déformations d’origine anthropique (lac Mead, USA) ou tectonique (faille de Haiyuan, Chine)*. Thèse de doctorat, 2007.
- [3] Curtis W Chen et Howard A Zebker. Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization. *JOSA A*, 18(2): 338–351, 2001.
- [4] Curtis W Chen et Howard A Zebker. Phase unwrapping for large sar interferograms : Statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8):1709–1719, 2002.
- [5] Mario Costantini. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 36(3):813–821, 1998.
- [6] Ville de Montréal. Schéma d’aménagement et de développement de l’agglomération de montréal. Téléchargeable à https://www.dropbox.com/s/d88pmdg4wjshxh3/Schema_38_DocumentIntegral.pdf, 2015.
- [7] Denis L. Deledalle, C.A. et F. Tupin. Nl-insar : Nonlocal interferogram estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(4):1441–1452, 04 2011.
- [8] Atlas du paysage du mont Royal. Caractérisation du paysage à l’échelle de la montagne, 2012.
- [9] Heresh Fattahi et Falk Amelung. Insar observations of strain accumulation and fault creep along the chaman fault system, pakistan and afghanistan. *Geophysical Research Letters*, 43(16):8399–8406, 2016.

- [10] Qingqing Feng, Huaping Xu, Zhefeng Wu, Yanan You, Wei Liu et Shiqi Ge. Improved goldstein interferogram filter based on local fringe frequency estimation. *Sensors*, 16(11):1976, 2016.
- [11] Xiaoming Gao, Yaolin Liu, Tao Li et Danqin Wu. High precision dem generation algorithm based on insar multi-look iteration. *Remote Sensing*, 9(7):741, 2017.
- [12] Richard M Goldstein et Charles L Werner. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical research letters*, 25(21):4035–4038, 1998.
- [13] Richard M Goldstein, Howard A Zebker et Charles L Werner. Satellite radar interferometry : Two-dimensional phase unwrapping. *Radio science*, 23(4):713–720, 1988.
- [14] Gao Jian. Reliability-map-guided phase unwrapping method. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(5):716–720, 2016.
- [15] Papathanassiou K.P. Ainsworth T.L. Grunes M.R. Lee, J.S. et A. Reigber. A new technique for noise filtering of sar interferometric phase images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(05):1456–1465, 09 1998.
- [16] Jin-wei Li, Zhen-fang Li, Zheng Bao, Ying-long Hou et Zhi-yong Suo. Noise filtering of high-resolution interferograms over vegetation and urban areas with a refined nonlocal filter. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(1):77–81, 2014.
- [17] Penélope López-Quiroz, Marie-Pierre Doin, Florence Tupin, Pierre Briole et Jean-Marie Nicolas. Time series analysis of mexico city subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1):1–15, 2009.
- [18] P Lundgren, F Casu, M Manzo, A Pepe, P Berardino, E Sansosti et R Lanari. Gravity and magma induced spreading of mount etna volcano revealed by satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 31(4), 2004.

- [19] Batuhan Osmanoğlu, Timothy H Dixon, Shimon Wdowinski, Enrique Cabral-Cano et Yan Jiang. Mexico city subsidence observed with persistent scatterer insar. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(1):1–12, 2011.
- [20] Gabriela Siles, Juan Alcérreca-Huerta, Penélope López-Quiroz et Wolfgang Niemeier. Long term subsidence analysis and soil fracturing zonation based on insar time series modelling in northern zona metropolitana del valle de mexico. *Remote Sensing*, 7(6):6908–6931, 2015.
- [21] Rui Song, Huadong Guo, Guang Liu, Zbigniew Perski et Jinghui Fan. Improved goldstein sar interferogram filter based on empirical mode decomposition. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(2):399–403, 2013.
- [22] Andrew Sowter, Moh Bin Che Amat, Francesca Cigna, Stuart Marsh, Ahmed Athab et Lubna Alshammari. Mexico city land subsidence in 2014–2015 with sentinel-1 iw tops : Results using the intermittent sbas (isbas) technique. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 52:230–242, 2016.
- [23] Ayoub Tlili, François Cavayas et Samuel Foucher. A new interferometric phase unwrapping method based on energy minimization from contextual modeling. Dans *IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages 1701–1704. IEEE, 2019.
- [24] Ayoub Tlili, François Cavayas et Samuel Foucher. A new formulation of the anisotropic adaptative gaussian filter for interferogram denoising. *Chapter 4 of this thesis*, pages 50–65, 2020.
- [25] Nations United. *World Population Prospects : the 2010 Revision*, volume 1. UN, 2011.
- [26] Flora Weissgerber, Elise Colin-Koeniguer, Jean-Marie Nicolas et Nicolas Trouvé. 3d monitoring of buildings using terrasar-x insar, dinsar and polsar capacities. *Remote Sensing*, 9(10):1010, 2017.

- [27] Gang Xu, Yandong Gao, Jin-wei Li et Mengdao Xing. Insar phase denoising : A review of current technologies and future directions. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020.
- [28] Néstor Yagüe-Martínez, Pau Prats-Iraola, Fernando Rodriguez Gonzalez, Ramon Brcic, Robert Shau, Dirk Geudtner, Michael Eineder et Richard Bamler. Interferometric processing of sentinel-1 tops data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(4):2220–2234, 2016.
- [29] Hanwen Yu, Yang Lan, Yuan Zhihui, Junyi Xu et Hyongki Lee. Phase unwrapping in insar : A review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 7:40–58, 03 2019.
- [30] Howard A Zebker et John Villasenor. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 30(5):950–959, 1992.

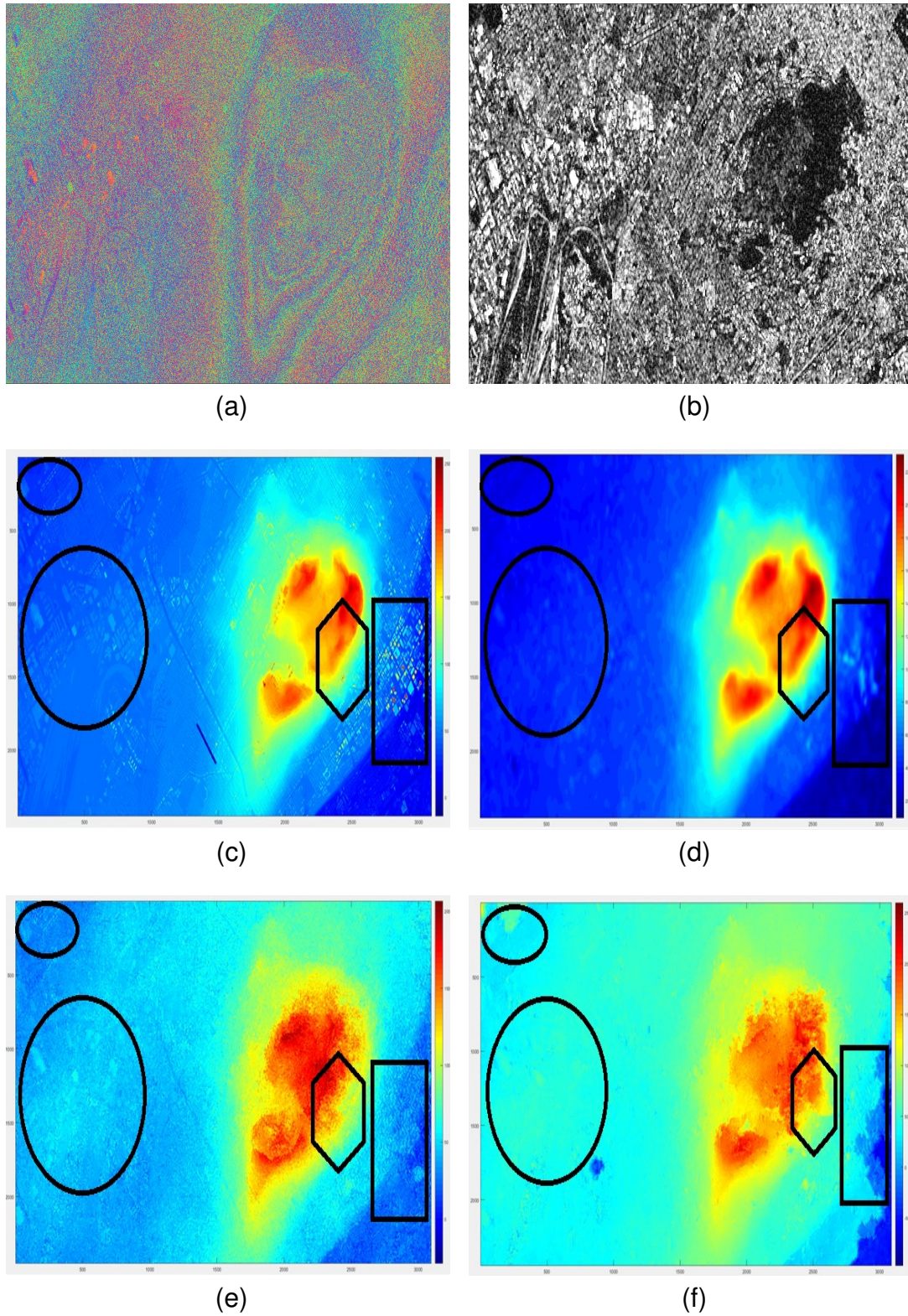


Figure 6.10 : Interferogram (a) and coherence image (b) generated from the interferometric pair of RADARSAT-2 (figure 6.2); Application of the proposed algorithms (e); Application of the Goldstein-SNAPHU algorithms (f).

CHAPITRE 7

DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

7.1 Discussions générales

Les algorithmes de filtrage et de déroulement de phase proposés sont testés avec des données simulées et réelles. De plus les résultats de ces algorithmes sont comparés aux résultats des algorithmes standards de filtrage (Goldstein [9], Baran [1], Lee-InSAR [13], Lee-InSAR modifié [2] et Boxcar) et de déroulement de phase ("Brunch-Cuts" (BC) [10], "Minimum Cost Flow Networks" (MCF) [5], et "Minimum lp-norm" (lp-norm) [8]). Différentes mesures de qualité des résultats sont utilisées à ce fin. En effet, l'erreur quadratique moyenne RMSE est utilisée pour comparer globalement les résultats des différents algorithmes par rapport à des images de références (interférogrammes simulés). Encore, l'indice de similarité structurelle (SSIM) [17] est calculé pour évaluer la capacité des algorithmes à maintenir localement l'information de la texture dans les interférogrammes. Finalement, le nombre de résidus laissés par algorithme est comparé sachant que les pixels résidus sont considérés comme des pixels sources de bruit [9].

D'après ces tests, les meilleurs résultats de filtrage des images simulées sont obtenus avec l'algorithme proposé et cela se vérifie pour les trois tests. Cet algorithme est capable de lisser les images simulées sans altérer l'information locale de la texture tout en minimisant le nombre de résidus. Concernant les images réelles, les RMSE sont presque équivalents pour tous les algorithmes de filtrage. Considérant les scores de SSIM, les algorithmes de Lee-InSAR, Boxcar et l'algorithme proposé dépassent les autres algorithmes. L'algorithme proposé maintient ses bonnes performances quant à la réduction du nombre de résidus avec les images simulées.

Le RMSE et le SSIM sont utilisés pour comparer les résultats des algorithmes de déroulement de phase. Les comportements de ces algorithmes dépendent fortement du niveau de bruits de phase ainsi que du niveau de variations topographique. Encore, la

concentration des hauts buildings au centre-ville de Montréal a compliqué d'avantage la tâche de ces algorithmes. Pour une forte cohérence (>0.6), l'algorithme proposé et celui de BC donnent les meilleurs résultats, et cela peut s'expliquer par le fait que ces algorithmes ajoutent un multiple de 2π aux pixels à corriger sans modifier les valeurs originales de l'interférogramme, contrairement aux autres algorithmes de MCF et Lp-norm. L'augmentation de la fréquence de bruit interférométrique par la diminution de la cohérence interférométrique n'entraîne pas des grands changements des résultats des algorithmes de déroulement de phase globale MCF et Lp-norm. Cette augmentation affecte aussi les résultats de l'algorithme de BC mais dans une moindre mesure. La variation du gradient de phase causée par les variations des hauteurs des bâtiments a entraîné des sauts de phase supplémentaires. Ces sauts de phase ont causé des propagations d'erreurs dans le cas des algorithmes de BC, MCF et Lp-norm. En revanche, l'algorithme proposé a été capable de détecter ces sauts de phase et de les ignorer tout au long du processus de déroulement de phase. Sur les images réelles, l'algorithme proposé a été capable de donner des résultats comparables à ceux des images simulées, contrairement aux autres algorithmes où le développement du bruit interférométrique sur le Mont-royal due à une perte de cohérence a conduit à des résultats irréalistes.

Les algorithmes proposés de filtrage et de déroulement de phase ont été utilisés dans le cadre de deux applications d'InSAR. L'objectif de la première application est de générer une carte de déformations de surface de la région de SPVM en Mexico. La deuxième application consiste à construire un MNA de la région du Mont-Royal de la ville de Montréal. Les mêmes traitements interférométriques sont reproduits pour les deux applications, mais en remplaçant les algorithmes proposés de filtrage et de déroulement de phase respectivement par des algorithmes standards de Goldstein [10] et de SNAPHU [3]. Les traitements interférométriques sont faits avec le logiciel SNAP de l'ESA, les deux algorithmes proposés étant développés sous forme d'un plugin Java, qui a été intégré avec le logiciel Snap. Les résultats de ces deux applications ont été comparés à des vérités terrain. Des résultats des études antérieures [12, 14–16] sont utilisés dans le cas de la cartographie des déformations de terrain de la région SPVM et un MNS Lidar

est utilisé dans le cas de la production d'un MNA de la région du Mont-Royal à l'île de Montréal.

Concernant la première application, les plus importantes déformations sont produites particulièrement dans les secteurs urbanisés situés sur un sol argileux. La vitesse de déformations moyenne estimée par les deux méthodes en utilisant les algorithmes standards et proposés est d'environ 0,035 m/mois, ce qui approche les valeurs publiées par les études antérieures. Les deux méthodes semblent surestimer les résultats sur les zones connues par des taux d'affaissements très élevés comme, par exemple, aux environs de l'aéroport de Mexico, où nous avons noté un déplacement moyen de 0.04 m/mois par rapport à un déplacement moyen de 0.025 m/mois dans les études antérieures. Ces différences peuvent s'expliquer par les différentes périodes d'acquisition des images, le type et la résolution des données, ainsi que les différents paramètres et méthodes utilisés dans les chaînes de traitements interférométriques. Dans l'ensemble, les résultats des deux approches sont assez similaires. Les plus grandes différences (0.025m) sont observées dans les zones montagneuses ou dans les zones qui sont caractérisées par une grande variation du gradient de déformation. En résumé, La comparaison des résultats obtenus avec ceux des autres études utilisant des acquisitions d'autres capteurs montre le potentiel de l'approche proposée pour les études de déformations du terrain.

Dans le cas de la création d'un MNA, le potentiel des algorithmes développés par rapport à celui des algorithmes standards de filtrage et de déroulement de phase est confirmé visuellement et selon les résultats de l'erreur RMSE. L'approche qui utilise les algorithmes proposés permet d'identifier et de préserver la structure des grands bâtiments qui se trouvent sur le flanc Nord-Ouest du Mont-Royal, contrairement à l'approche qui utilise les algorithmes standards. Ceci s'explique par le fait que le filtre Goldstein lisse davantage l'interférogramme et donc mène à une perte de l'information sur les structures des bâtiments. De plus, avec l'algorithme SNAPHU, les bâtiments élevés au centre-ville de Montréal ont mené à une surestimation des altitudes des zones environnantes causant ainsi des propagations d'erreurs. En revanche, la méthode de déroulement de phase proposée a été capable d'identifier et d'ignorer ces zones. Malgré encore la présence

du bruit interférométrique causé par une perte de cohérence sur la zone d'entre-monts qui se trouve au cœur du Mont-Royal, les algorithmes proposés ont été aptes à bien identifier les limites de franges. Globalement, avec l'approche proposée ont été capable d'identifier les différentes structures urbaines, de plus nous avons réussi de reproduire la topographie de la zone étudiée malgré la présence du bruit interférométrique. Tenant en compte la hauteur d'ambiguïté qui était d'une valeur de 23 mètres, l'erreur RMS globale (14,6 mètres) calculée en comparant les résultats de l'approche proposée par rapport à un MNS Lidar peut être considérée comme acceptable pour ce genre d'application.

7.2 Conclusions

Le but de cette recherche était d'optimiser les résultats des applications InSAR et DInSAR par la réduction des erreurs du traitement et par la réduction du bruit interférométrique. Pour ce fait, deux algorithmes de filtrage et de déroulement de phase ont été proposés.

L'algorithme de filtrage est une nouvelle formulation du filtre Gaussien Anisotrope Adaptatif basée sur la distribution statistique du bruit de phase. Des interférogrammes réels et simulés sont utilisés pour comparer les résultats de ce filtre avec d'autres filtres standards [1, 2, 6, 9, 13]. L'erreur quadratique moyenne et le nombre de résidus sont utilisés pour évaluer le comportement global des différents filtres. L'indice de similarité structurelle est utilisé pour tester localement la performance de ces filtres. Le filtre proposé donne les meilleurs résultats. En effet, il est capable de réduire le bruit interférométrique tout en préservant les variations du gradient de phase.

L'algorithme de déroulement de phase consiste à minimiser une fonction de coût en utilisant un algorithme génétique. La fonction du coût est la somme des poids de tous les pixels de l'interférogramme. Le poids attribué à chaque pixel est estimé en calculant le nombre des sauts de phase et le gradient de phase dans une fenêtre coulissante. Les résultats de cet algorithme sont validés avec des images simulées et des images RADARSAT-2 (polarisation HH; mode fin) couvrant une région l'île de Montréal. Ces

résultats confirment les performances de l'algorithme proposé. En effet, par rapport aux algorithmes standards [5, 8, 10], l'algorithme proposé génère les meilleurs résultats, de plus, il est très robuste face au bruit interférométrique.

L'applicabilité des algorithmes proposés est testée sur deux applications InSAR. L'objectif de la première application est de cartographier les déformations du terrain d'une région de la ville de Mexico. Tandis que la deuxième consiste à créer un MNA d'une région de l'île de Montréal. Des données Sentinel-1 et RADARSAT-2 sont utilisées, respectivement, pour la première et la deuxième application. Les traitements InSAR et DInSAR pour ces applications sont faits selon deux approches différentes en utilisant le logiciel SNAP de l'ESA. La première utilise les algorithmes de filtrage et de déroulement de phase proposés. Alors que la deuxième utilise des algorithmes standards de filtrage [10] et de déroulement de phase [3]. Les résultats de ces applications sont comparés à des études antérieures [12, 14–16], dans le cas de la cartographie des déformations, et avec un MNS Lidar à haute résolution, dans le cas de la production d'un MNA. L'évaluation de ces résultats à l'aide des indicateurs RMSE et SSIM confirme le potentiel de ces nouveaux algorithmes pour ces types d'applications InSAR.

7.3 Recherches futures

D'après les résultats des deux applications, les endroits les plus problématiques où nous avons eu le plus de difficultés lors du traitement interférométrique sont les endroits où il y'a eu une perte de cohérence ou une forte variation du gradient de phase. L'optimisation de la cohérence interférométrique peut être obtenue par l'introduction de l'information polarimétrique dans le traitement interférométrique. La cohérence maximale est obtenue lorsque la polarisation des deux images est la même, Cloude et Papathanassiou [4], parlent d'une dépendance entre forte polarisation et cohérence interférométrique. La technique PolInSAR développée relativement récemment, offre la possibilité d'obtenir plusieurs combinaisons polarimétriques selon les différents canaux de polarisations HH, HV et VV. Encore, elle offre la possibilité de transformer le vecteur de diffusion dans n'importe quelle base polarimétrique, nous permettant ainsi, de former des inter-

férogrammes dans tous les états de polarisations elliptiques possibles sur la sphère de Poincaré. L'ensemble de ces interférogrammes peut en principe aider à optimiser les résultats de l'algorithme de filtrage.

La technique "Multi-Baseline" [7, 11] qui utilise plusieurs couples interférométriques avec différents longueurs de lignes de base est une autre approche possible pour améliorer les résultats des algorithmes de déroulement de phase et surtout sur les zones où il y'a une variation topographique élevée [11]. En effet, une grande ligne de base est sensible aux variations topographiques, mais elle peut induire des décorrélations géométriques. En revanche, une petite ligne de base diminue ces erreurs de décorrélations mais augmente la valeur de la hauteur d'ambiguïté et ainsi diminue la résolution de l'interférogramme selon l'axe verticale. L'idée est donc, d'utiliser l'interférogramme obtenu avec une petite ligne de base pour guider le processus de déroulement de phase sur l'interférogramme obtenu avec une grande ligne de base.

Bibliographie

- [1] Ireneusz Baran, Mike P Stewart, Bert M Kampes, Zbigniew Perski et Peter Lilly. A modification to the goldstein radar interferogram filter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(9):2114–2118, 2003.
- [2] Chin-Fu Chao, Kun-Shan Chen et Jong-Sen Lee. Refined filtering of interferometric phase from insar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(12):5315–5323, 2013.
- [3] Curtis W Chen et Howard A Zebker. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping : intractability and two new algorithms. *JOSA A*, 17(3):401–414, 2000.
- [4] Shane R Cloude et Konstantinos P Papathanassiou. Polarimetric sar interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 36(5):1551–1565, 1998.

- [5] Mario Costantini. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 36(3):813–821, 1998.
- [6] Charles-Alban Deledalle, Loïc Denis et Florence Tupin. Nl-insar : Nonlocal interferogram estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(4):1441–1452, 2010.
- [7] Alessandro Ferretti, Claudio Prati et Fabio Rocca. Multibaseline insar dem reconstruction : The wavelet approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(2):705–715, 1999.
- [8] Dennis C Ghiglia et Louis A Romero. Minimum lp-norm two-dimensional phase unwrapping. *JOSA A*, 13(10):1999–2013, 1996.
- [9] Richard M Goldstein et Charles L Werner. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical research letters*, 25(21):4035–4038, 1998.
- [10] Richard M Goldstein, Howard A Zebker et Charles L Werner. Satellite radar interferometry : Two-dimensional phase unwrapping. *Radio science*, 23(4):713–720, 1988.
- [11] J Homer, ID Longstaff et G Callaghan. High resolution 3-d sar via multi-baseline interferometry. Dans *IGARSS'96. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, volume 1, pages 796–798. IEEE, 1996.
- [12] Riccardo Lanari, Paolo Berardino, Manuela Bonano, Francesco Casu, Claudio De Luca, Stefano Elefante, Adele Fusco, Michele Manunta, Mariarosaria Manzo, Chandrakanta Ojha et al. Sentinel-1 results : Sbas-dinsar processing chain developments and land subsidence analysis. Dans *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pages 2836–2839. IEEE, 2015.
- [13] Jong-Sen Lee, Konstantinos P Papathanassiou, Thomas L Ainsworth, Mitchell R Grunes et Andreas Reigber. A new technique for noise filtering of sar interferometric phase images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(5):1456–1465, 1998.

- [14] Penélope López-Quiroz, Marie-Pierre Doin, Florence Tupin, Pierre Briole et Jean-Marie Nicolas. Time series analysis of mexico city subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1):1–15, 2009.
- [15] Gabriela Siles, Juan Alcérreca-Huerta, Penélope López-Quiroz et Wolfgang Niemeier. Long term subsidence analysis and soil fracturing zonation based on insar time series modelling in northern zona metropolitana del valle de mexico. *Remote Sensing*, 7(6):6908–6931, 2015.
- [16] Andrew Sowter, Moh Bin Che Amat, Francesca Cigna, Stuart Marsh, Ahmed Athab et Lubna Alshammari. Mexico city land subsidence in 2014–2015 with sentinel-1 iw tops : Results using the intermittent sbas (isbas) technique. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 52:230–242, 2016.
- [17] Zhou Wang, Alan C Bovik, Hamid R Sheikh, Eero P Simoncelli et al. Image quality assessment : from error visibility to structural similarity. *IEEE transactions on image processing*, 13(4):600–612, 2004.